



PROJET DE FIN D'ETUDES

THEME

COUPLAGE DE GENERATEURS PHOTOVOLTAIQUES AU RESEAU ELECTRIQUE DE L'ASECNA/OUAGADOUGOU POUR L'ALIMENTATION DE TROIS SHELTERS ABRITANT LES AIDES RADIOS A LA NAVIGATION AERIENNE.

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

Présenté et soutenu publiquement le 21 /11/2011 par

Jean Michel BAKO

Travaux dirigés par : Ing. KOTTIN Henri

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr. AZOUMAH Yao

Membres et correcteurs :

Dr. SIDIBE Sayon

Ing. RUNGUNDU Anselme

Promotion 2010/2011

CITATIONS

« *L'intelligence est une grande poutre, placée sur l'immense et interminable voie du savoir et qui s'oriente à plus ou moins l'infini, selon que l'on continue de s'instruire ou que l'on s'endort sur l'acquis* ». **LE SAGE**

REMERCIEMENTS

Qu'il nous soit permis de remercier tous ceux qui ont contribué, d'une manière ou d'une autre à l'aboutissement de ce mémoire ; nous leur en sommes très reconnaissant.

Nos remerciements vont particulièrement à M. Henri KOTTIN, mon maître de mémoire pour sa disponibilité et ses conseils nous ont été d'un précieux secours.

Nos remerciements vont également à :

- Monsieur le Représentant de L'ASECNA-Burkina et ses collaborateurs,
- Mes camarades de promotion.
- Le corps enseignant du 2iE.

RESUME

L'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar (ASECNA) créée en décembre 1959 dans le but d'assurer les services destinés à garantir la sécurité des vols au dessus des espaces aériens des pays membres, a mis en place un réseau autonome d'alimentation en énergie électrique. Ce réseau est la combinaison d'une source provenant de la SONABEL et de groupes électrogènes. Ce système utilise l'énergie d'origine fossile qui est par nature épuisable et polluante. De plus c'est une énergie qui est soumise aux fluctuations des coûts du pétrole.

Pour prendre en compte ces enjeux et permettre à l'ASECNA de répondre efficacement aux exigences de la navigation aérienne, une combinaison d'une source solaire photovoltaïque au réseau existant a été envisagée.

Sur la base de l'état des lieux et des contraintes d'exploitations, il est proposé de connecter sur le réseau électrique basse tension au niveau du shelter 1 un générateur solaire photovoltaïque autonome de 16,8 Kwc. Le générateur solaire ne fonctionnant que dans la journée, un groupe électrogène diesel mobile de 14 KVA est prévu pour faire face à un défaut de la ligne d'alimentation électrique des shelters.

MOTS CLES

Générateurs solaires photovoltaïques : un générateur solaire photovoltaïque est une source d'énergie électrique renouvelable composé de modules photovoltaïques eux même composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles.

Shelter : un shelter est un local situé au sein de l'aéroport et abritant des équipements de la navigation aérienne. A l'aéroport international de Ouagadougou il en existe trois.

GLIDE/DME : le glide est un ensemble d'équipement qui a pour rôle de donner au pilote l'angle d'atterrissage. Il est installé dans le shelter 1.

LOCALISEUR : ensemble d'équipement servant à donner l'axe de la piste au pilote et installé dans le shelter 2.

VOR/DME : ensemble d'équipement servant à donner aux pilotes la position de l'aéroport et contenu dans le shelter 3.

ABSTRACT

The Agency for the Safety of Air Navigation in Africa and Madagascar (ASECNA) created in December 1959 in order to provide services to ensure the safety of flights over the airspace of the member countries, has established a network of autonomous power supply. This network is a combination of a source from the SONABEL and generators. This system uses the energy from fossil fuels is exhaustible and polluting in nature. In addition it is an energy which is subject to fluctuations in fuel costs.

To address these issues and allow the ASECNA effectively meet the requirements of Air Navigation, a combination of a solar photovoltaic source to the existing network was considered.

Based on the inventory and operating constraints, it is proposed to connect the low-voltage grid at the January 1 Schelter photovoltaic generator independently 16.8 kWp. The solar generator operating only during the day, a diesel generator 14 KVA Mobile is scheduled to address a defect in the electrical supply line of schelters.

KEY WORDS

Photovoltaic solar generators: A photovoltaic generator consists of photovoltaic modules themselves consist of photovoltaic cells connected together.

Schelter : Schelter is a local located within the airport and home equipment of air navigation.

GLIDE / DME: the glide is a set of equipment that role is to give the pilot the landing angle. It is installed in a Shelter.

Locator: all equipment used to make the runway the pilot and located in the Shelter 2.

VOR/DME: all equipment used to give pilots the position of the airport contained in Shelter 3

LISTE DES ABBREVIATIONS

ASECNA : Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar

Eqc : Energie quotidienne consommée

DME : (Distance Measuring Equipment) Dispositif de Mesure de distance

OACI : Organisation de l'Aviation Civile Internationale

SONABEL : Société Nationale d'Electricité du Burkina

VOR : VHF Omnidirectional Range (Radiophare Omnidirectionnel VHF)

PV: PhotoVoltaire

BT : Basse Tension

Pc : Puissance Crête

PR : Performance Ratio

Wc : Watt Crête

INT: interrupteur

SOMMAIRE

CITATIONS.....	i
REMERCIEMENTS / DEDICACES.....	iii
RESUME.....	iv
LISTE DES ABREVIATIONS.....	vi
SOMMAIRE.....	1
LISTE DES TABLEAUX.....	2
LISTE DES FIGURES.....	3
I. INTRODUCTION.....	4
II. PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES DE TRAVAIL.....	6
III. MATERIELS ET METHODES.....	7
III.1. Le dimensionnement de l'installation.....	7
III.2. L'évaluation du coût.....	8
III.3. Les économies prévisionnelles.....	8
IV. ETAT DES LIEUX.....	9
V. RESULTATS.....	15
VI. DISCUSSION ET ANALYSES.....	32
VII. CONCLUSION.....	38
VIII. RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES.....	39
BIBLIOGRAPHIE.....	40
ANNEXES.....	41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Moyenne journalière de l'irradiation totale sur une surface plane de quelques villes africaines (KWh/m²/j)

Tableau 2 : Relation entre la latitude et l'inclinaison des panneaux (utilisation annuelle)

Tableau 3 : Production annuelle d'énergie

Tableau 4 : Coût de l'installation

Tableau 5 : Synthèse de l'analyse économique

Tableau 6 : synthèse de la consommation énergétique actuelle de l'ASECNA/OUAGA

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma d'alimentation de l'aéroport international de Ouagadougou

Figure 2 : Schéma du circuit d'alimentation actuelle des shelters 2 et 3

Figure 3 : Schéma circuit d'alimentation actuelle des shelters 1 Glide

Figure 4 : Répartition des consommations annuelle d'énergie par shelter

Figure 5 : Carte d'ensoleillement

Figure 6 : Configuration du système

Figure 7 : Schéma de principe du générateur

Figure 8 : Schéma unifilaire général des shelter 2 et 3

Figure 9 : schéma de principe de câblage du système

Figure 10 : Configuration1 du niveau système pour le shelter 1 du Glide

Figure 11 : Schéma de principe du générateur raccordé au réseau sans batterie de stockage

Figure 12 : Schéma unifilaire général du shelter 1 Glide

La figure 13 : Schéma simplifié de système raccordé au réseau sans batterie de stockage

La figure 14 : Schéma de principe de câblage du système ci-dessus décrit.

La figure 15 : Camembert de la production annuelle d'énergie par shelter

I. INTRODUCTION

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20 à 30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les exploiter sur le lieu de consommation, en les transformant directement soit en chaleur, soit en électricité selon les besoins. La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement¹

L'énergie solaire est la seule énergie renouvelable dont le potentiel pourrait, sur la base d'un calcul théorique, couvrir tous les besoins énergétiques de la planète.

Au Burkina Faso malgré l'existence d'un très grand potentiel en énergie solaire, le constat est la priorisation de l'énergie fossile. C'est ainsi que de grands consommateurs d'énergie comme l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar (ASECNA), dans le cadre de sa mission, utilise l'énergie électrique du réseau public de la société nationale burkinabè d'électricité (SONABEL) d'une part et une source autonome (groupes électrogènes diesel) d'autre part. Cette source d'énergie est non seulement coûteuse au regard de la fluctuation du coût du pétrole, mais aussi a des conséquences néfastes sur l'environnement. De plus, c'est une énergie épuisable.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous proposons d'étudier la faisabilité technique et économique d'une utilisation de générateurs solaires photovoltaïques avec le réseau électrique actuel de l'ASECNA pour le besoin en énergie électrique de trois shelters abritant les aides à la navigation aérienne. Plus spécifiquement, il s'agit de faire une offre technique, et financière d'une autre source d'alimentation des shelters en zone aéroportuaires.

¹ ADEME : Agence pour le Développement et la Maîtrise de l'Energie.

La présente étude est structurée en sept (7) parties qui sont :

- Problématique et hypothèses de travail (II) ;
- Méthodes et techniques (III) ;
- Etat des lieux (IV)
- Résultats (V) ;
- Discussions et Analyse (VI) ;
- Conclusion (VII) ;
- Recommandations et perspectives (VIII).

II. PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES DE TRAVAIL

L'ASECNA / Burkina Faso est confronté de plus en plus à une augmentation de sa consommation en énergie électrique. Cette augmentation est une conséquence de l'extension des activités aéroportuaires et des nouvelles exigences de sécurités. Ainsi, la fourniture en énergie provenant de la SONABEL qui était de 200 KW avant 2004, est passée à 300 KW en 2004 et à 360 KW depuis janvier 2011. Celle du réseau autonome assuré par les groupes électrogènes a aussi progressé, passant de 250 KVA avant 2004 à 400 KVA.

Ces chiffres à eux seuls suffisent pour montrer les enjeux énergétiques auxquels l'ASECNA/Burkina doit faire face.

Il convient d'ajouter que les équipements qu'abritent les shelters devant fonctionner sans interruption, une éventuelle coupure de la fourniture en énergie peut entraîner des désagréments. En effet, l'aéroport international de Ouagadougou dispose de trois shelters abritant des équipements d'aides radios à la navigation aérienne qui fonctionnent 24 heures sur 24 et sont alimentés en énergie électrique par un seul départ. En cas de panne sur ce départ (défaut boîte de jonction, câbles coupés, transformateur etc.) la fourniture d'électricité au niveau de ces shelters sera interrompue.

Aussi, les hypothèses de recherche suivantes ont-elles été relevées :

- la consommation énergétique de l'ASECNA peut-elle être réduite grâce à une combinaison de générateurs solaires photovoltaïques avec le réseau électrique actuel ?
- l'utilisation de générateurs solaires permet-t il de faire face à une éventuelle interruption de l'alimentation en énergie électrique et maintenir l'alimentation des équipements de la navigation aérienne dans les shelters ?

III. MATERIELS ET METHODES

Il s'agit ici de répertorier les différentes techniques et méthodes utilisées pour l'atteinte des objectifs fixés.

Dans un premier temps il s'agit de faire une fiche synoptique du réseau électrique existant de relever les insuffisances afin de faire des propositions d'amélioration. Dans un second temps

Pour la réalisation d'une installation solaire de production d'électricité, une étude préalable est nécessaire. Elle permet de juger de l'opportunité de l'opération et d'évaluer son intérêt potentiel en fonction de la nature des besoins en électricité (importance et régularité annuelle) et de l'existence de contraintes techniques. Cela se fait à partir :

- d'un dimensionnement de l'installation,
- de l'évaluation de son coût,
- de l'évaluation des économies prévisionnelles,
- de son intégration dans le réseau électrique existant.

III.1. Le dimensionnement de l'installation

Le dimensionnement de l'installation est basé sur l'évaluation des besoins en électricité, l'exposition énergétique solaire du site et l'étude d'implantation des capteurs solaires.

L'évaluation des besoins est un préalable à toute étude d'une installation électrique et au choix des appareils de production. Dans l'hypothèse où l'on connaît les consommations d'énergie de tous types qui ont lieu dans l'utilisation quotidienne du Shelter (E_{qc} en Wh/jour), énergie effectivement consommée pour remplir les fonctions attendues, on peut déterminer les besoins énergétiques journaliers (B_j) en kWh/jour par la relation $B_j = \sum E_{qc}$.

L'exposition énergétique solaire du site : pour un site donné, la quantité d'énergie reçue par les capteurs dépend de l'exposition énergétique de ce site et des conditions d'implantation des capteurs. Les données relatives au rayonnement solaire peuvent être obtenues à partir des stations météorologiques qui sont réparties sur l'ensemble du territoire ou dans des Atlas

Climatiques.

L'étude d'implantation des capteurs permet d'avoir des informations sur les conditions climatiques et l'influence des ombres et des masques. Dans la pratique, les capteurs solaires doivent être installés de manière à ce que les périodes durant lesquelles tout ou partie du champ n'est pas ensoleillée du fait d'obstacles environnants soient de faible durée.

On considère que cette condition est remplie si, dans le cas de journées non nuageuses, toute la surface du champ de capteurs bénéficie d'un ensoleillement direct d'au moins 4 heures par jour durant le mois de décembre et d'au moins 8 heures par jour durant le mois de juin. Au Burkina Faso, l'inclinaison normale des capteurs solaires varie en général entre 12 et 15 degrés par rapport à l'horizontale pour une utilisation annuelle.

Les différentes études dans le cadre du dimensionnement permettent de déterminer le système à mettre en place et d'évaluer son coût.

III.2. L'évaluation du coût

Il s'agira ici de dresser, d'abord, la liste des différents composants du système, d'en déterminer leur coût, ensuite, d'estimer le coût d'installation afin de proposer l'évaluation financière globale du système à mettre en place.

III.3. Les économies prévisionnelles.

Il s'agira, à travers une étude comparative de la consommation du système existant et de celui à mettre en place, des avantages techniques des deux systèmes, de démontrer les gains que le système proposé permet de réaliser.

IV. ETAT DES LIEUX

IV.1. Analyse diagnostique du réseau d'alimentation actuel.

Le diagnostic réalisé sur l'alimentation en électricité de l'aéroport international de Ouagadougou fait ressortir l'utilisation de deux sources d'énergie : l'énergie du réseau public SONABEL et celle autonome produit à partir de deux groupes électrogènes. Pour mieux gérer le trafic aérien l'ASECNA a mis en place un certains nombres de structures (Shelters) abritant des équipements de la navigation aérienne que sont :

- le **GLIDE/DME**²,
- le **LOCALISEUR**²,
- le **VOR/DME**².

Le trafic étant continu, ces équipements ne doivent pas être mis à l'arrêt ; d'où la nécessité de disposer d'un approvisionnement continu en électricité. Au regard de ces contraintes, l'ASECNA a pris des dispositions en vue de satisfaire les besoins en énergie électrique en créant son propre réseau électrique de distribution basé sur la redondance des sources d'alimentation. Ainsi, une centrale électrique, comprenant une arrivée SONABEL de 15KV avec deux transformateurs abaisseurs de 630KVA et deux groupes électrogènes diesel autonomes de secours de 400KVA chacun, a été mis en place.

IV.1.1. Principe de fonctionnement de la centrale électrique

Le fonctionnement de la centrale électrique a été conçu pour permettre une continuité de l'alimentation en énergie électrique des différents équipements techniques quels que soient le ou les défauts. Les critères pris en compte sont :

- les conditions opérationnelles :

² Voir définition en début de rapport

- les cas de maintenances des groupes électrogènes.

Afin d'assurer cette continuité, les principes retenus sont les suivants :

- permutabilité automatique des deux sources d'énergie (secteur et groupes) étant entendu que les deux groupes électrogènes sont également permutables automatiquement avec possibilité d'inversion manuelle des sources ;
- mise en place d'un commutateur (manœuvrable manuellement) de choix de source ;
- mise en place d'une alimentation sans coupure (onduleur) ;
- présence permanente d'un personnel de surveillance.

IV.1.2. Fonctionnement des groupes électrogènes.

Chaque groupe électrogène a deux possibilités de fonctionnement :

- avec automatisme : le groupe est commandé depuis le pupitre de commande via l'automate ;
- en ultime secours : le groupe est commandé depuis l'armoire groupe.

En automatique : Le démarrage automatique du groupe choisi prioritaire est assuré par deux systèmes (électrique et pneumatique) fonctionnant en secours mutuel, chacun d'eux pouvant être sélectionné soit en normale soit en secours. Ainsi, en cas de défaut secteur ou de la commande manuelle, le système de démarrage choisi en normal est sollicité. En cas de non démarrage, il est procédé à une seconde tentative suivant le même procédé. Si le groupe n'a toujours pas démarré le système choisi en secours est à son tour sollicité deux fois si nécessaire. En cas d'insuccès le défaut « non démarrage » est affiché et le second groupe sélectionné en secours est démarré suivant les mêmes séquences.

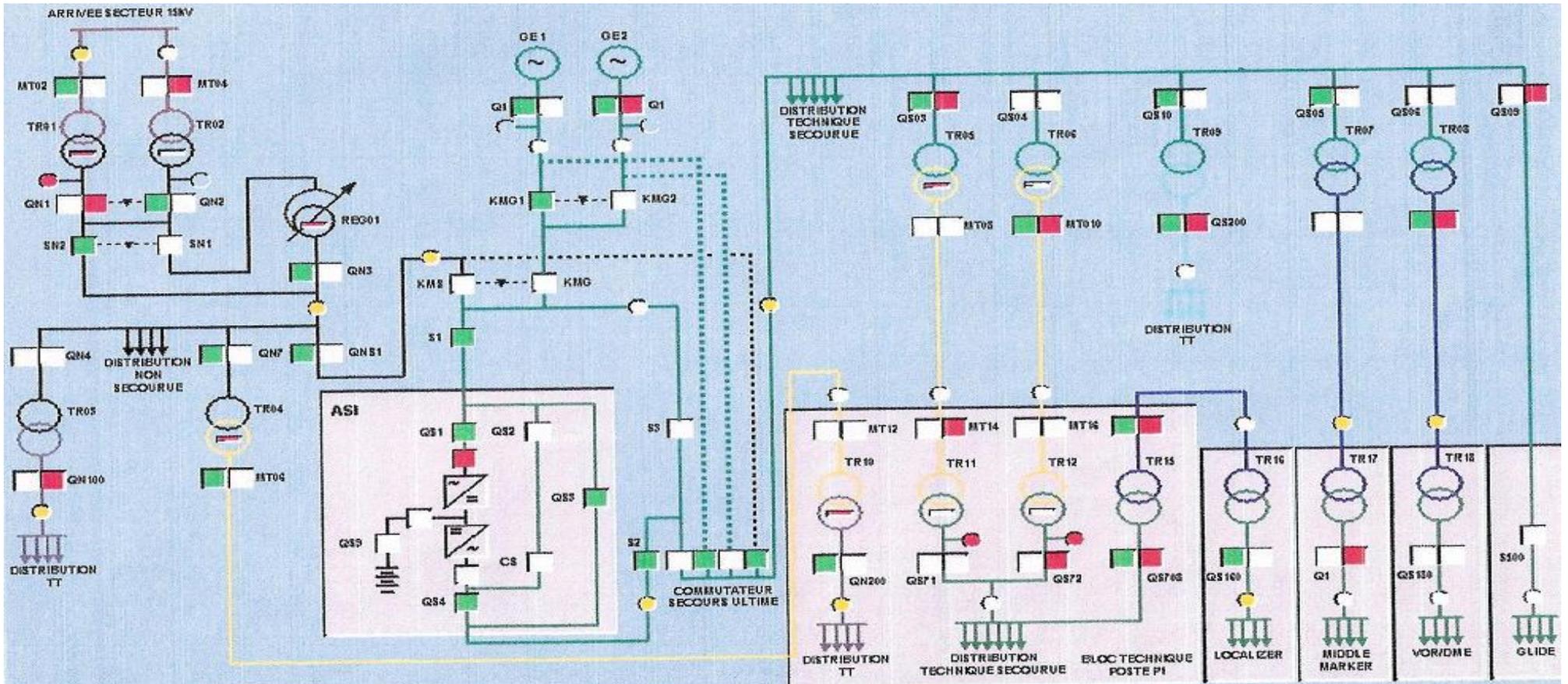
En ultime secours : En ultime secours, les commandes des groupes et des inverseurs groupes/groupes se font localement sur les tableaux correspondants. Sur le pupitre de commande

la clé prisonnière en position « automatisme » est libérée en position « ultime secours », elle permet, sur l'armoire du groupe, la mise en service et le démarrage de celui-ci.

Dans cette configuration l'alimentation de l'automate qui contrôle le groupe est coupé et les commandes manuelles, par boutons poussoirs, des contacteurs groupe sur le TGBT sont opérationnelles.

(figure 1).

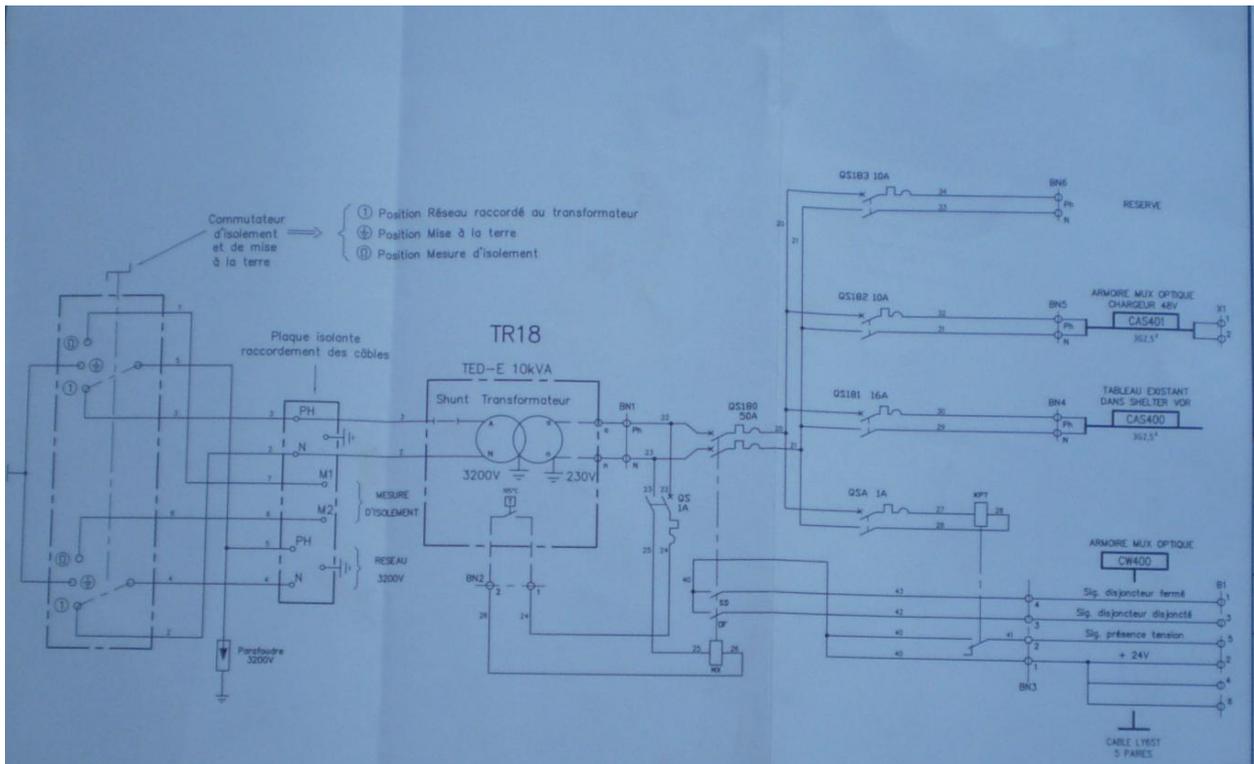
Figure 1 : Schéma de l'alimentation de l'aéroport international de Ouagadougou



Le système permet ainsi de fournir l'énergie nécessaire à l'alimentation de l'ensemble des installations de l'aéroport international de Ouagadougou dont les Shelters.

Pour les shelters concernés les figures 2 et 3 ci-dessous représentent respectivement les circuits d'alimentation actuel des shelters 2 et 3 et de celui 1.

Figure 2 : Schéma du circuit d'alimentation actuelle des shelters 2 et 3

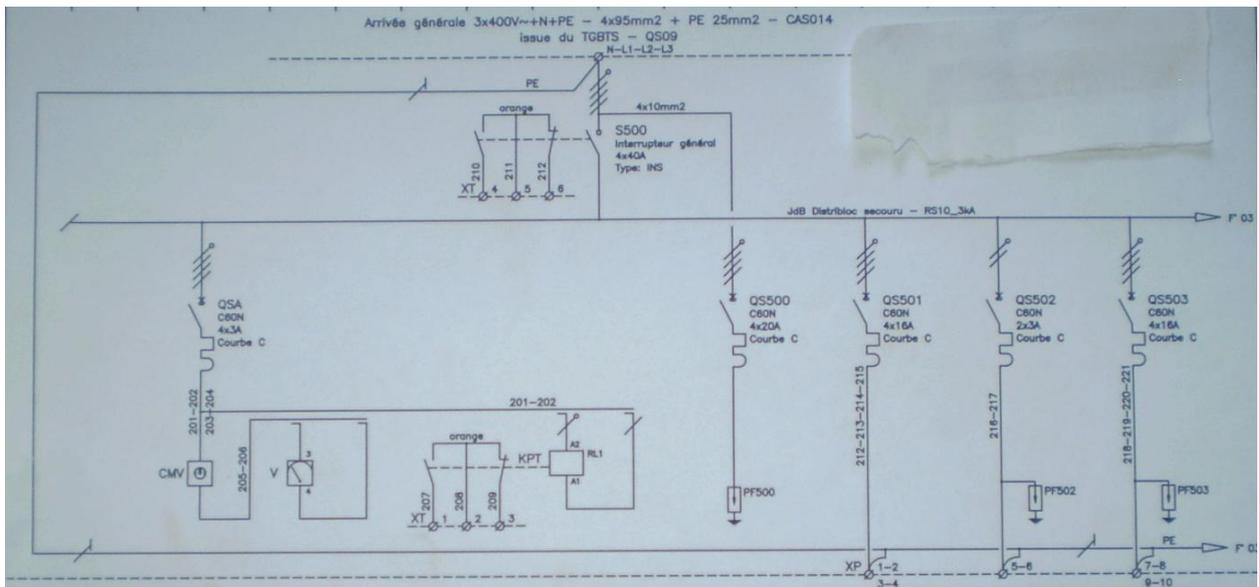


L'alimentation en énergie électrique des shelters 2 et 3 est assurée par un circuit identique comprenant un transformateur abaisseur de 3,2 Kv / 230 v – 50 Hz situé à 6 Km à proximité de chaque shelter. Il assure l'alimentation en énergie depuis la centrale électrique de l'ASECNA.

COUPLAGE DE GENERATEURS PHOTOVOLTAIQUES AU RESEAU ELECTRIQUE DE L'ASECNA/DUAGADUGOU POUR L'ALIMENTATION DE TROIS SHELTERS ABRITANT LES AIDES RADIOS A LA NAVIGATION AERIENNE.

Le shelter 1 abritant le Glide situé à environ 300 mètres de la centrale électrique est, quant à lui, alimenté directement en triphasé depuis celle-ci en basse tension (410V/230V50Hz).

Figure 3 : Schéma du circuit d'alimentation actuelle du shelters 1 Glide



V. RESULTATS

V.1. Analyse diagnostique des données énergétiques.

Avant de concevoir ou d'améliorer l'installation électrique d'un local ou d'un bâtiment, il est indispensable d'étudier ses besoins énergétiques et les sources disponibles et de rechercher la meilleure adéquation des systèmes de gestion, des réseaux de distribution et des équipements consommateurs en tenant compte des impératifs d'exploitation.

Il s'agit ici de déterminer les besoins en énergie électrique dans chaque shelter par un inventaire de tous les appareils électriques qui y sont installés.

Le tableau 3 montre le résultat de cet inventaire.

Tableau 3 : bilan de puissance d'un shelter

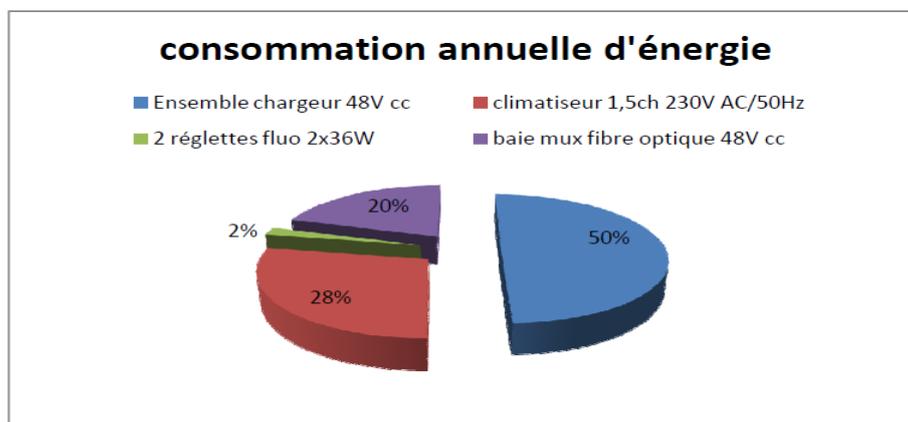
Recepteurs		nature courant	quantité	puissance (W)	puissance totale (W)
GLIDE DME 48V/30A	normal	CC	1	1440	1440
	secours	CC	1	1440	1440
chargeur /batterie	normal	CA	1	1943,5	1943,5
	secours	CA	1	1943,5	1943,5
	batterie12V	CC	4	92Ah	368Ah
climatiseur 230V,1,5ch		CA	2	1104	2208
réglettes fluo 230V, 2x36W		CA	2	38,25	76,5
baie mux fibre optique 48V/12A	chargeur	CA	1	791,2	791,2
	batterie12V	CC	4	25Ah	100Ah

Les résultats ci-dessus permettent de déterminer les besoins énergétiques quotidiens des shelters; toute chose qui est indispensable au dimensionnement des sources d'énergie électrique.

L'inventaire des consommations d'énergie nécessaire à l'exploitation quotidienne des shelters pour remplir les fonctions (figure 4) fait ressortir :

- 50% de consommation par les équipements spécifiques (VOR- DME, Glide-DME, Localizer ;
- 28% par la climatisation des locaux, étant donnée que pour un bon fonctionnement, les équipements doivent être maintenus à une certaine température ($< 25^{\circ}$) ;
- 20% pour la télésignalisation, le téléphone, ... ;
- 2% pour l'éclairage.

Figure 4 : Répartition des consommations annuelle d'énergie par shelter

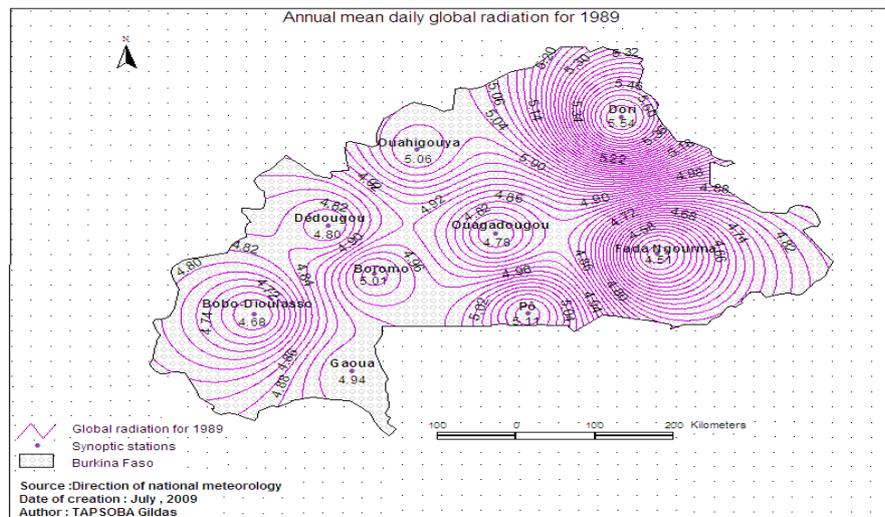


Pour faire fonctionner tout ce système, l'ASECNA s'est doté d'un service de maintenance comprenant des ingénieurs électrotechniciens et électroniciens.

V.2. Analyse diagnostique de l'ensoleillement

A l'analyse des données d'entrée énergétiques il convient de faire celle de l'ensoleillement pour le dimensionnement du générateur solaire à proposer. Pays sahélien situé au cœur de l'Afrique de l'Ouest, le Burkina Faso a un grand potentiel d'énergie soleil avec une irradiation minimale moyenne journalière de 5,19 au mois de décembre et maximale de 6,31 au mois d'avril. (voir figure 5)

Figure 5 : Carte d'ensoleillement



Le tableau 1 ci-dessus donne les moyennes journalières de l'irradiation de quelques villes africaines.

Tableau 1 : Moyenne journalière de l'irradiation totale sur une surface plane de quelques villes africaines (kWh/m²/j)

Lieu	Mois											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Bangui	4,50	5,16	5,81	5,67	5,44	4,76	4,45	4,63	5,08	5,26	4,64	4,35
Dakar	5,2	5,93	6,99	7,02	6,95	6,51	5,78	5,10	5,40	5,50	5,00	4,87
Caire	3,36	4,40	5,83	6,76	7,2	7,58	7,43	6,96	6,13	4,86	3,58	3,08
Ouagadougou	5,61	6,36	6,28	6,31	6,22	6,06	5,81	5,47	5,94	5,83	5,75	5,19

Il convient de souligner que la quantité d'énergie reçue sur une surface donnée dépend de la latitude du lieu et de l'inclinaison des panneaux, (tableau 2).

Tableau 2 : Relation entre la latitude et l'inclinaison des panneaux (utilisation annuelle)³

Latitude φ ($^{\circ}$)	Inclinaison α ($^{\circ}$)
$\varphi < 10^{\circ}$	$\alpha = 10^{\circ}$
$10^{\circ} < \varphi < 30^{\circ}$	$\alpha = \varphi$
$30^{\circ} < \varphi < 40^{\circ}$	$\alpha = \varphi + 10^{\circ}$
$\varphi > 40^{\circ}$	$\alpha = \varphi + 15^{\circ}$

En plus de la latitude et de l'inclinaison, les ombres et les masques ont une influence sur le rayonnement solaire. Ainsi, en saison hivernale, les masses nuageuses constituent des obstacles pour un bon ensoleillement.

L'examen de la fiche synoptique du réseau électrique existant a permis d'identifier les insuffisances suivantes :

- la non prise en compte des considérations relatives aux changements climatiques dans les plans et stratégies dans le secteur de l'énergie sur le réseau électrique de l'ASECNA.
- la consommation d'énergie sans cesse en croissance.
- le risque éventuel de coupure de la fourniture de l'énergie électrique dans les shelters.

Pour aider l'ASECNA/Ouaga à faire face à de tels enjeux, les mesures et stratégies d'adaptation à travers une utilisation d'autres sources d'énergie électrique peuvent être envisagées. Pour le cas présent, il s'agit d'étudier la faisabilité technique et économique de générateurs solaires photovoltaïques.

³ Source : Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque Sylvain BRIGAND, 2008

V.3. Faisabilité technique

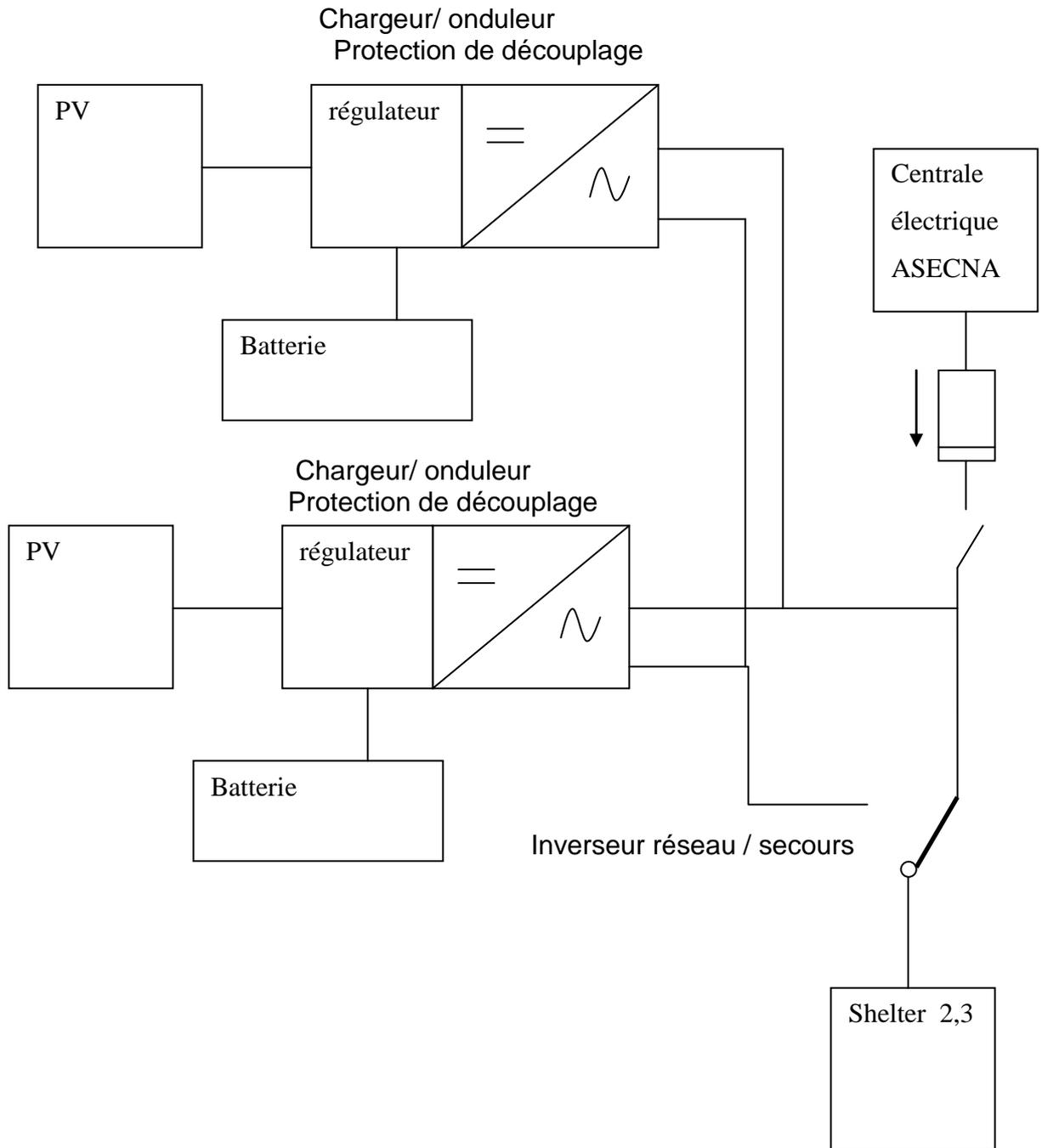
Dans le cadre de la mise en place de générateurs solaires photovoltaïques, deux solutions techniques peuvent être analysées en fonction de la configuration particulière des équipements et de leur lieu d'emplacement : les systèmes autonomes avec batterie, et l'installation photovoltaïque raccordée au réseau sans batterie de stockage

V.3.1 Système raccordé au réseau avec batterie de stockage.

Le système autonome avec batterie ou Système secours du circuit électrique monophasé est une combinaison de batterie de stockage d'énergie à partir de champ photovoltaïque. Il sert généralement à alimenter un équipement qui a besoin d'énergie aussi bien le jour que la nuit.

La figure 6 ci-dessous montre la configuration de ce système dans le schéma d'alimentation des shelters 2 et 3.

Figure 6 : configuration du système pour les shelters 2,3



Principe de fonctionnement :

▪ Présence du réseau électrique

En période d'ensoleillement, l'énergie fournie par les panneaux solaires va maintenir en charge la batterie 48V(tension de floating) via un régulateur de charge adaptateur d'impédance. L'excédent d'énergie photovoltaïque fourni est converti en énergie alternative 230 V par un onduleur synchrone et réinjecté sur le réseau au fil du soleil (sortie réseau de l'onduleur).

Cette injection est possible tant que le réseau reste dans la plage de tolérance de tension et fréquence préfixée au niveau de l'onduleur.

Les circuits secourus sont alimentés également par le réseau mais via un inverseur normal secours automatique.

▪ Défaillance du réseau électrique :

En cas de défaillance du réseau électrique (absence ou hors tolérance) :

- L'onduleur s'arrête de fonctionner en mode synchrone et bascule instantanément en mode autonome
- les circuits électriques sont basculés automatiquement sur la sortie de l'onduleur autonome

Au retour de la tension du réseau, l'onduleur continue de fonctionner en mode autonome pendant quelques minutes et bascule ensuite en mode synchrone pour réinjecter l'énergie photovoltaïque fournie si l'ensoleillement est suffisant.

Le dimensionnement de ce système permet de déterminer la puissance-crête du générateur solaire et la capacité de la batterie, à partir des données d'ensoleillement du site d'une part, et des besoins électriques de l'utilisateur d'autre part. Le choix des composantes du système solaire doit permettre de fournir l'énergie requis aux équipements des shelters durant la période demandée (c'est-à-dire tout au long de l'année ou pour une période déterminée), et ce avec une disponibilité prédéterminée.

Pour déterminer la demande énergétique quotidienne (Bj) à satisfaire par les générateurs solaires, il faut, d'abord dresser la liste des caractéristiques électriques (disponibles généralement sur les plaques signalétiques) des appareils à faire fonctionner, ensuite fixer la tension pour le câblage des panneaux photovoltaïques (U = 400 Volts). Ces équipements destinataires de l'électricité photovoltaïque doivent être sobres énergétiquement.

Pour être certain de disposer d'énergie électrique toute l'année, les calculs sont faits dans les conditions d'ensoleillement les moins favorables de la période d'utilisation. Dans le cas de la₂₁

ville de Ouagadougou, le mois le moins favorable est Décembre. Ainsi, l'énergie nécessaire pour le générateur est obtenue par la relation : $P_{ns} \times N$ représentant le nombre de panneaux parallèles ; P_{ns} : la puissance d'un panneau

$$\underline{P_{ns} = (U_{b \text{ syst}}/U_{mod}) \times P_{mod} = (400/30,2) \times 230 = 3360 \text{ Wc}}$$

$$\underline{N = P_c \text{ calculé} / P_{ns}, N = 3,81}$$

En utilisant des modules BP de 230wc/29,2v le générateur qui convient à Bj est : $N \times 3220$, $N = 3,81$ arrondi à 4, N étant nécessairement un nombre entier. La tension étant de 400 V, on a donc déterminé un générateur de 12,88 Kwc composé de 4 panneaux de 3220 Wc.

(Voir annexe 3 pour calculs détaillées)

La taille du GPV est l'aire occupée par l'ensemble des modules photovoltaïques montés en série et en parallèle, pour satisfaire les besoins énergétiques des shelters. Elle s'obtient par la relation suivante :

$$\underline{Area = NMS \times NMP \times Scel \text{ NMS}}$$

Considérant le rendement de la batterie et le rendement du convertisseur, le rendement du système peut s'écrire.

$$\underline{\eta_{sys} = \eta_g \times \eta_B \times \eta_C}$$

La capacité (C) de la batterie à installer est déterminée par l'expression :

$$\underline{C (Ah) = (A \times B_j) / (DD \times U)}$$

DD étant la limite de décharge profonde de la batterie, (généralement compris entre 60 et 80%).

A l'autonomie souhaitée a priori (exprimée en jours et correspondant au nombre de jours pendant lesquels la demande énergétique doit être couverte sans apports solaires).

Si on fixe l'autonomie A à deux (2) jours et DD à 0,8 (80%), la capacité C s'obtient comme suit :

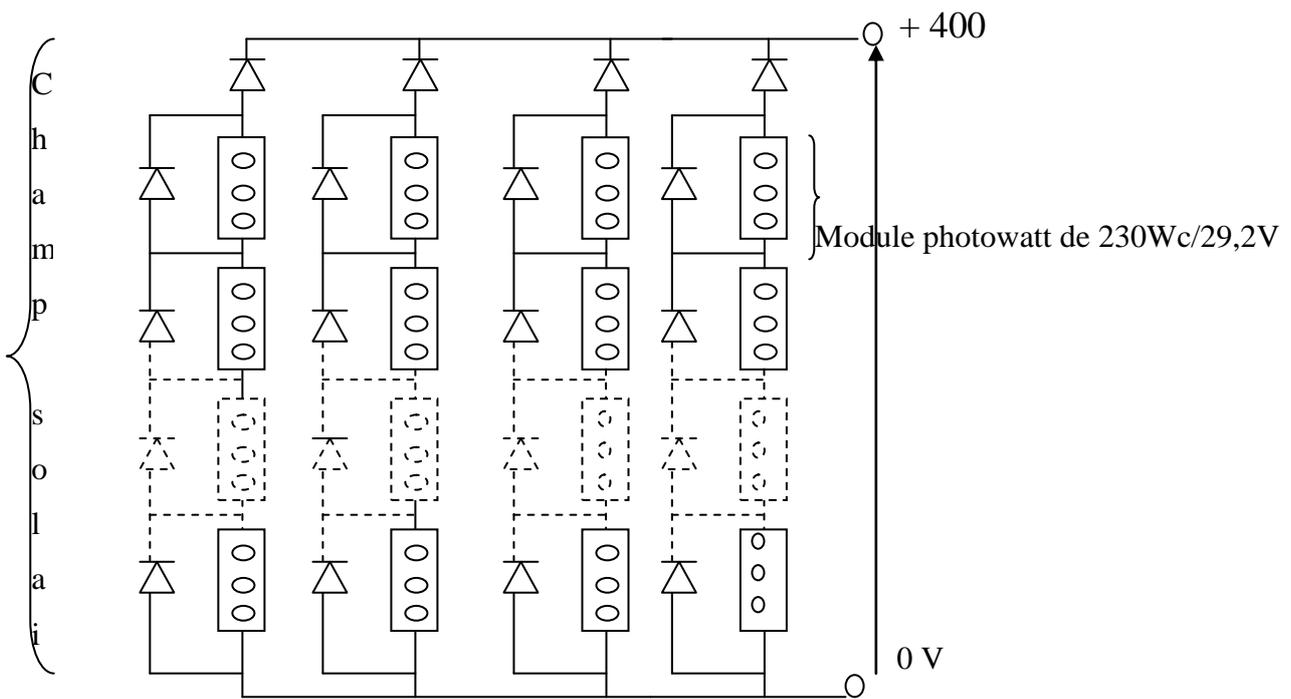
$$\underline{C (Ah) = (2 \times 39 \ 618,1) / (48 \times 0,8) = 2 \ 063,45 \text{ Ah}}$$

(voir annexe 4).

Pour avoir un générateur de 48 V, en choisissant une batterie AGM 12V " Solar Bloc" 90Ah, il faudra 24 batteries montées en six (6) branches constituées chacune de quatre batteries montées en série pour avoir le générateur. La capacité C10 du générateur est supérieur à 2 063,45 Ah ; ce qui donne un générateur de 48 V / 12,88Kwc / 2160 Ah pour le fonctionnement en mode secours. La capacité calculée C se rapportant à 10 h. Le choix de l'onduleur est fait de sorte que le rapport⁴ entre la puissance nominale de l'onduleur et la puissance crête du champ de modules correspondant soit compris entre 0,7 et 1.

La figure 7 donne le schéma du principe du générateur à installer. Ce générateur est composé d'une association série parallèle de quatre (4) branches de 14 modules solaires BP3230N montées en série avec deux (2) onduleurs sunny backup set s (SBU-set-S)

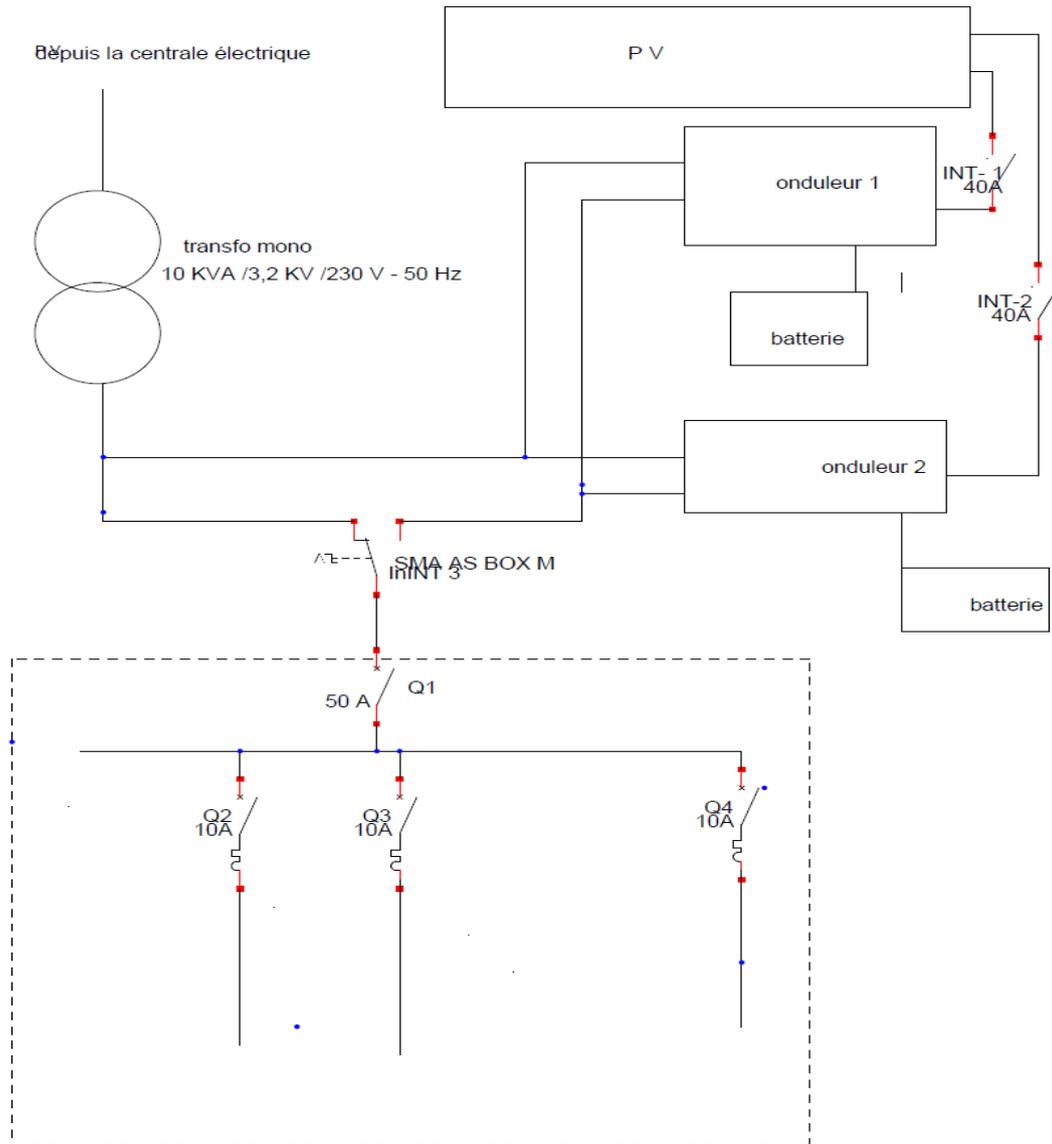
Figure 7 : Schéma de principe du générateur



Le système photovoltaïque proposé est branché directement sur le réseau électrique, il est installé près de la demande (shelters), comme le montre le schéma de la figure 8.

⁴ Source : Institut National de l'Energie Solaire- INES-Education

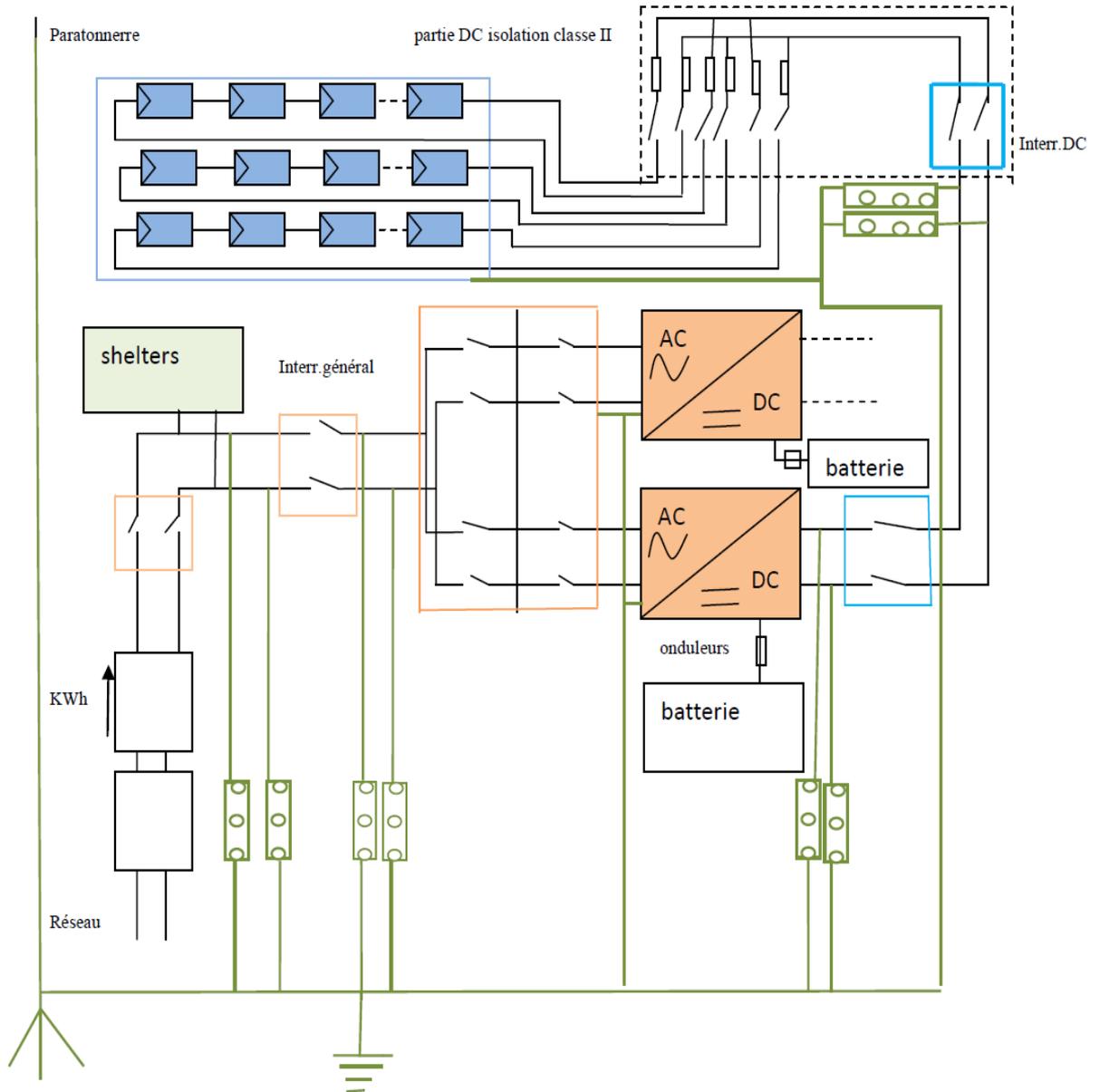
Figure 8 : Schéma unifilaire des shelter 2 et 3



La figure 9 ci-dessous montre le schéma de câblage du système décrit.

COUPLAGE DE GENERATEURS PHOTOVOLTAIQUES AU RESEAU ELECTRIQUE DE L'ASECNA/DUAGADOUGOU POUR L'ALIMENTATION DE TROIS SHELTERS ABRITANT LES AIDES RADIOS A LA NAVIGATION AERIENNE.

Schéma de principe de câblage du système ci-dessus décrit de shelters 2,3.



Le générateur solaire photovoltaïque ainsi dimensionné permet d'estimer la production annuelle d'énergie électrique. Le tableau ci-dessous donne les valeurs annuelles engendrées par cette production, l'aéroport international de Ouagadougou étant définie par une Latitude de 12° 20'13" Nord et une Longitude de 001°30'43''W⁵.

Tableau 4 : Estimation de la production annuelle du générateur

Station Météo	Ouagadougou
Latitude du lieu	12°20
Modules PV	BP Solar BP 3230N (Verre/Polyester)
	Puissance 230 Wc Surface unitaire 1,667 m2
Orientation	0 ° /Sud
Inclinaison	15 ° /horizontale
Surface utile	93,4 m2
Puissance crête	12,9 kWc

Mois	Energie solaire reçue plan horizontal Wh/m2.j	Energie solaire reçue plan des capteurs Wh/m2.j	Electricité produite par le système kWh/mois
Janvier	5 860	6 786	2 032
Février	6 690	7 400	2 002
Mars	6 830	7 057	2 113
Avril	6 720	6 536	1 894
Mai	6 580	6 119	1 832
Juin	6 600	5 983	1 734
Juillet	5 290	4 963	1 486
Août	5 810	5 574	1 669
Septembre	5 870	5 886	1 706
Octobre	6 040	6 428	1 925
Novembre	5 870	6 668	1 932
Décembre	5 490	6 407	1 919
Total énergie (kWh/an)			22 244
Total CO2 évité (kg/an)(*)			8 008
Productivité (kWh/kWc.an)			1 727

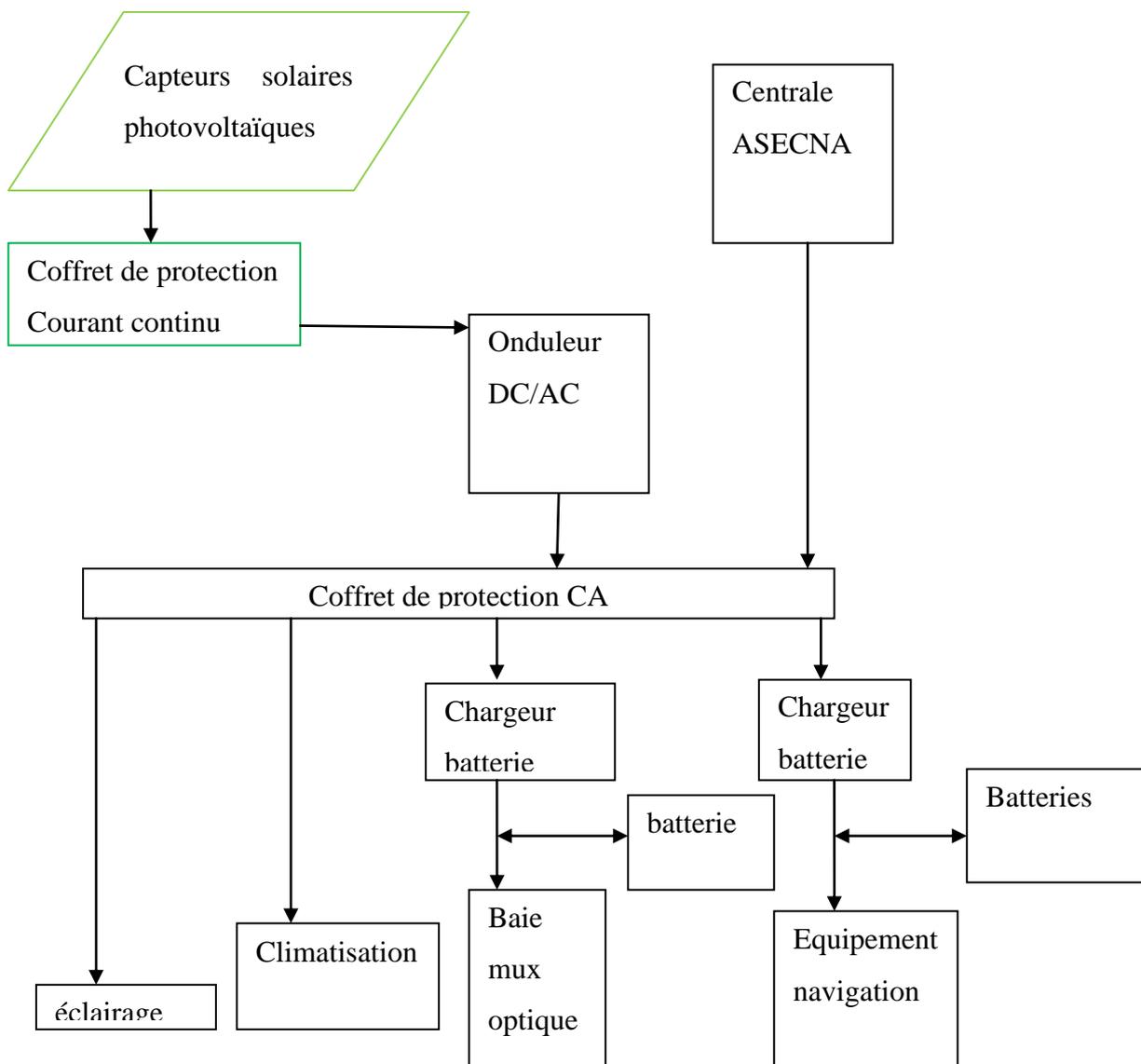
(*) 360g/kWh coefficient européen

⁵ Cours de thermique solaire, Dr Harzouma YAO ,2011

V.3.2 installation photovoltaïque raccordée au réseau sans batterie de stockage.

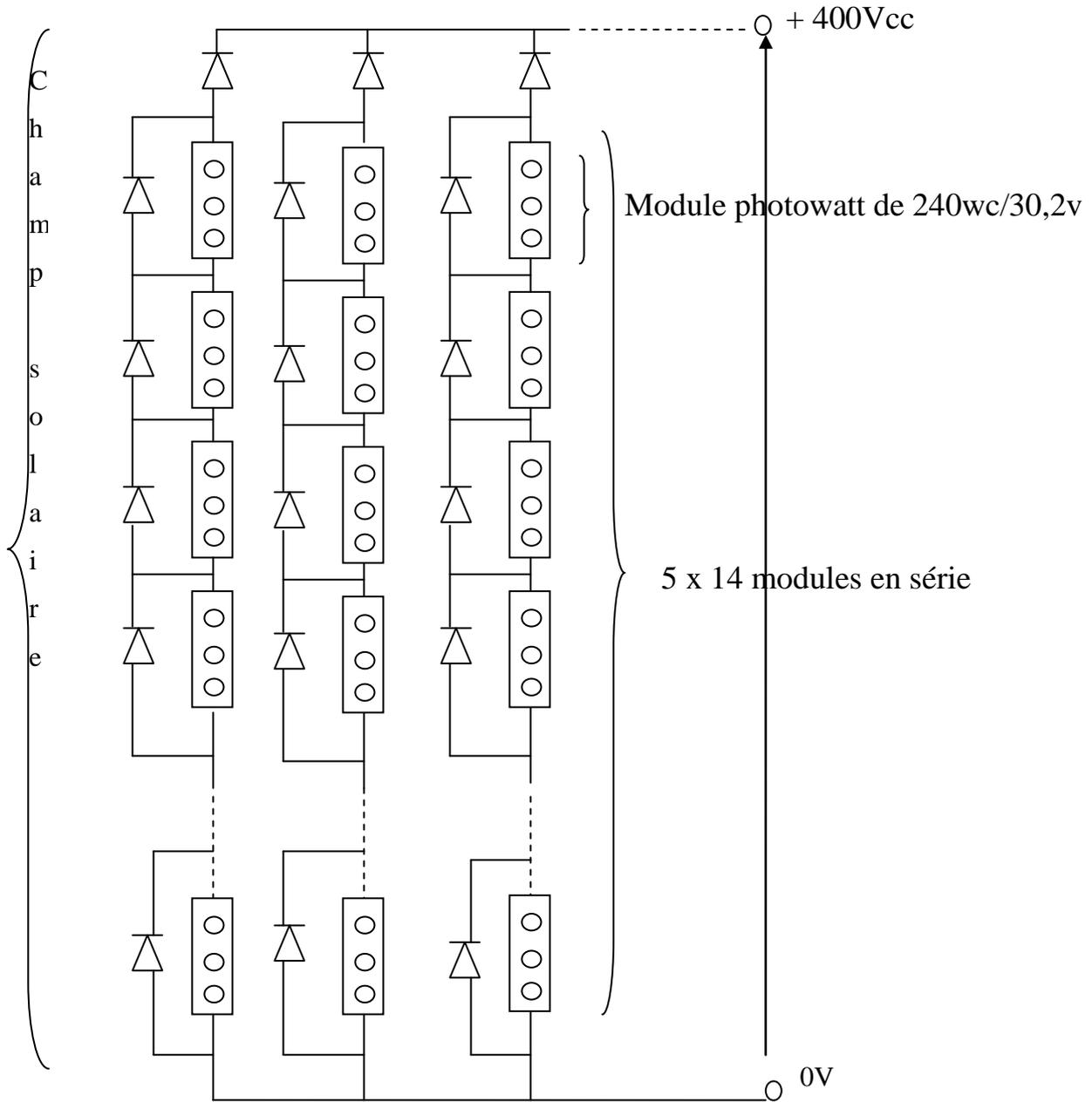
Ce système photovoltaïque PV sur réseau est branché directement sur le réseau électrique triphasé basse tension, niveau du shelter 1 du Glide et est installé près de la demande de telle sorte qu'il alimente cette charge et fournit l'excédent de sa production sur le réseau durant le jour. Durant la nuit, la charge puise l'énergie requise sur le réseau électrique de l'ASECNA. (Voir figure 9)

Figure 10 : Configuration1 du niveau système pour le shelter 1 du Glide



La figure 11 donne le schéma du principe du générateur à installer.

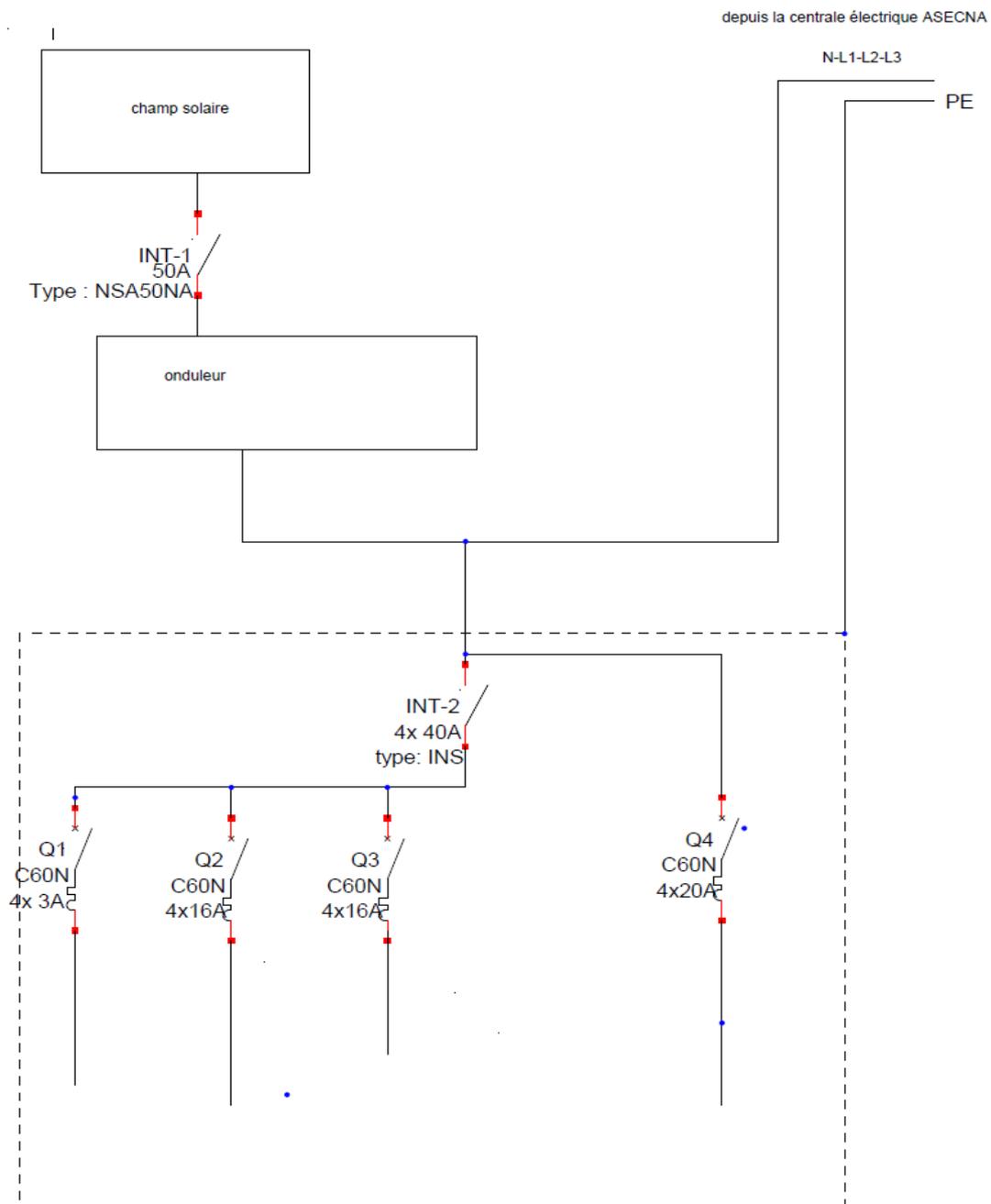
Figure 11 : Schéma de principe du générateur



Le système photovoltaïque proposé est branché directement sur le réseau électrique au niveau du schelter 1, il est installé près de celui-ci de telle sorte qu'il alimente les équipements du Glide et le surplus est injecté dans le réseau de l'ASECNA via la centrale électrique qui se trouve à 300 mètres.

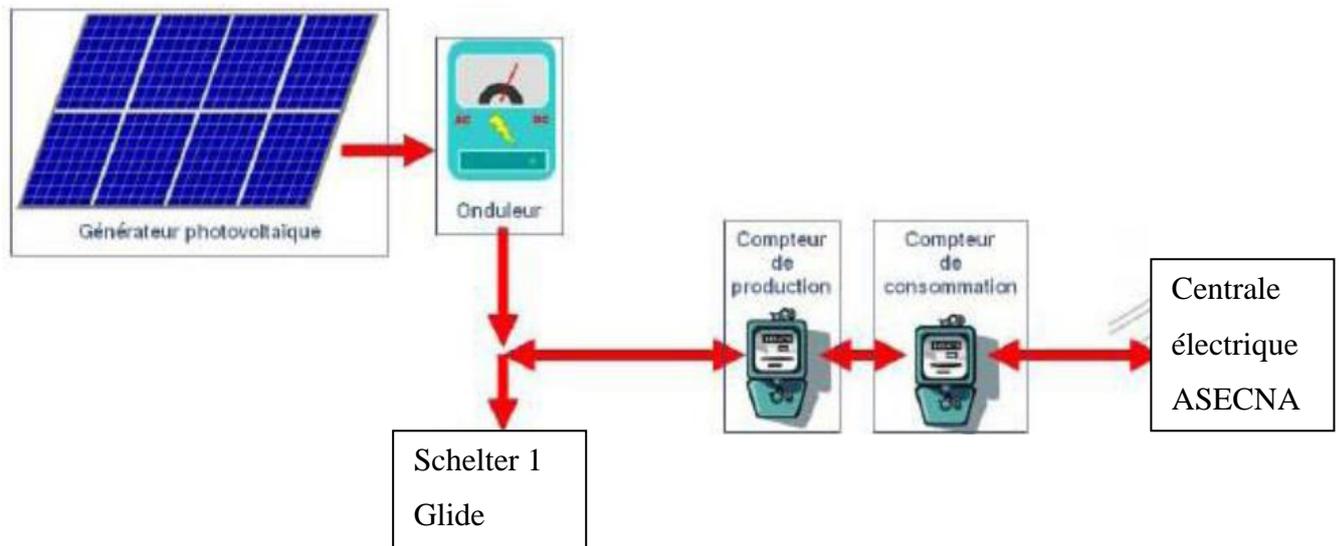
Le schéma ci-après présente l'installation à réaliser dans le shelter 1 (Glide)

Figure 12 : Schéma unifilaire du shelter 1 (Glide)



La Figure 13 montre le schéma simplifié du système photovoltaïque raccordé au réseau avec une possibilité d'utiliser le surplus de la production pour les besoins énergétiques d'autres équipements.

Figure 13 : le schéma simplifié du système photovoltaïque raccordé au réseau



L'onduleur convertit l'énergie électrique DC du champ PV en énergie électrique AC compatible en tension et en fréquence du réseau électrique de l'ASECNA, il recherche le point de puissance maximum (MPPT) et la déconnection est automatique en cas de coupure secteur.

Sur la base du même principe de calculs utilisé pour le système autonome avec batterie le générateur solaire à connecter sur le réseau au niveau du shelter 1 (Glide) aura les caractéristiques ci après :

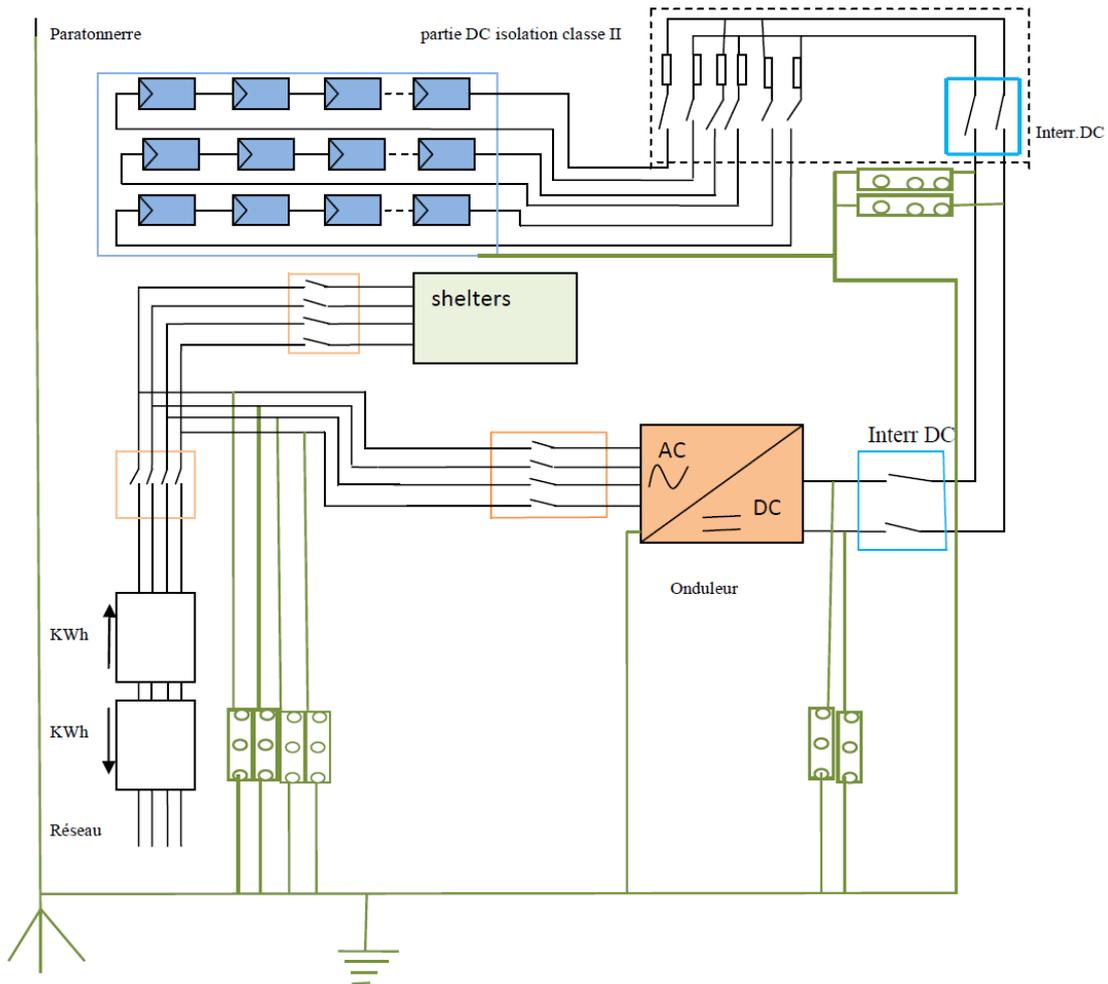
- Puissance crête 16,8 KWc,
- 70 modules SW 240 poly
- 1 onduleur SMA Sunny Tripower 15000TL
- ratio $P_{ond}/P_c = 0,89$.

COUPLAGE DE GENERATEURS PHOTOVOLTAIQUES AU RESEAU ELECTRIQUE DE L'ASECNA/DUAGADOUGOU POUR L'ALIMENTATION DE TROIS SHELTERS ABRITANT LES AIDES RADIOS A LA NAVIGATION AERIENNE.

En utilisant des modules photowatt PW240-30,2v multi cristallin et un onduleur SMA Sunny Tripower 15000TL la tension nominale de l'onduleur étant de 400 Vcc, le générateur qui convient est de 16,8 KWc composé de 5 panneaux de 3360 Wc.

La figure 14 ci-dessous montre le schéma de câblage du système décrit.

La figure 14 : Schéma de principe de câblage du système ci-dessus décrit.



Le câblage ainsi réalisé, permet de déterminer les valeurs annuelles produites (voir tableau 4)

Tableau 4 : Estimation de la production annuelle du générateur

Station Météo	Ouagadougou
Latitude du lieu	12°20
Modules PV	Photowatt PW2050 (Verre/TPT)
	Puissance 215 Wc Surface unitaire 1,467 m2
Orientation	0 ° /Sud
Inclinaison	15 ° /horizontale
Surface utile	114,4 m2
Puissance crête	16,8 kWc

Mois	Energie solaire reçue plan horizontal Wh/m2.j	Energie solaire reçue plan des capteurs Wh/m2.j	Electricité produite par le système kWh/mois
Janvier	5 860	6 786	2 646
Février	6 690	7 400	2 606
Mars	6 830	7 057	2 752
Avril	6 720	6 536	2 466
Mai	6 580	6 119	2 386
Juin	6 600	5 983	2 258
Juillet	5 290	4 963	1 935
Août	5 810	5 574	2 173
Septembre	5 870	5 886	2 221
Octobre	6 040	6 428	2 506
Novembre	5 870	6 668	2 516
Décembre	5 490	6 407	2 498
Total énergie (kWh/an)			28 963
Total CO2 évité (kg/an)(*)			10 427
Productivité (kWh/kWc.an)			1 727

(*) 360g/kWh coefficient européen

Cette analyse technique doit être complétée par une étude financière a fin de déterminer les coûts d'installation de chaque système, ce qui permettra d'opérer un choix judicieux.

V.4. Faisabilité financière.

Calcul des coûts d'installation du système générateur solaire photovoltaïque

Les tableaux suivants proposent des offres financières des systèmes analysés à mettre en place.

Tableau 5 : coût de l'installation (cas de combinaison de solaires générateurs photovoltaïques des schelter 2 et 3)

estimation de prix				Pt en wc	12,88
liste des composants du système					
désignation des composants et caractéristiques		prix/ Wc	puissance installée wc	prix totale	
modules 230Wc 29,2V, polycristallin		2000	12880	25760000	
support module		200		2576000	
câbles et divers accessoires		250		3220000	
génie civil , local batterie		125		1610000	
armoie de commande		200		2576000	
tuyauterie et accessoires		350		4508000	
Batterie C10 /2160(24 x Batterie AGM 12V " Solar Bloc" 90Ah)		24	186347,5	4472340	
inverseur AIGISA15000		1	382873,7	382873,7	
onduleurs Sunny backup set S		4	2519457,5	10077830	
coût totale des composants		d'un schelter		55183043,7	
		des deux schelters	2	110366087	
2. coût d'installation du système					
transport des composants			200		
main-d'œuvre(nb de techniciens x salaire quotidien x nb jours)					
autres coût (logement...)					
		coût total d'installation			2576000
3.prix de revient du système					
4.prix de vente de l'installation		prix de vente= coût total du système x% de marge			
15% < marge < 25%		20%			
		prix de vente minimum			135530505
coût total général					3 406591515

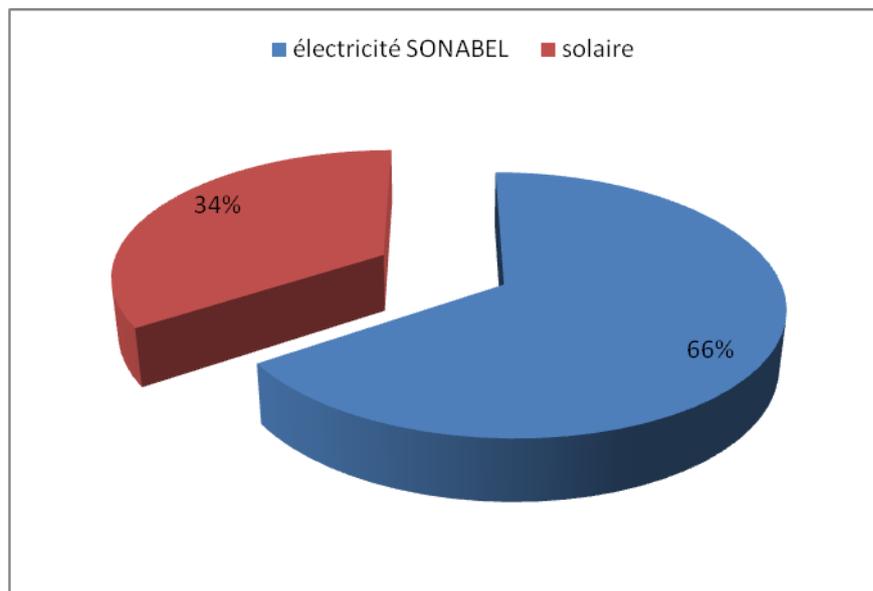
Tableau 6 : coût de l'installation cas de combinaison de générateurs solaires au shelter 1 du Glide

estimation de prix					
					16700
liste des composants du système					
désignation des composants et caractéristiques			prix/ Wc	puissance installée wc	prix totale
modules 240Wc 12, polycristallin			1	16700	23319703
support module			200		3340000
câbles et divers accessoires			250		4175000
génie civil clôture			0		0
armoie de commande			200		3340000
tuyauterie et accessoires			350		5845000
onduleur photovoltaïque SMA Sunny Tripower 15000TL			1	2858354,5	2858354,5
coût totale des composants					42878057,5
2. coût d'installation du système					
transport des composants				200	
main-d'œuvre (nb de techniciens x salaire quotidien x nb jours)					
autres coût (logement...)					
coût total d'installation					3340000
3. prix de revient du système					
4. prix de vente de l'installation		prix de vente = coût total du système x% de marge			
15% < marge < 25%		20%			
prix de vente minimum					55461669

VI. DISCUSSION ET ANALYSES

L'utilisation de générateurs solaires photovoltaïques couplés sur réseau (circuit monophasé) via deux onduleurs sunny backup set S sans batterie supplémentaire de stockage de 1876 Ah, permettra de couvrir 34% des besoins énergétiques de chaque schelter pour environ 8 huit heures d'utilisation par jour.(figure 13)

Figure 15 : Camembert de la production annuelle d'énergie par schelter



Le système autonome permettra de réaliser un gain total de 115 632 KWh /an soit une économie de 12 025 728 F CFA avec un coût moyen de 104 F CFA le KWh. Cependant le coût d'investissement de départ d'un tel système est très élevé au regard du coût d'acquisition des batteries, de la construction de locaux pour les abriter et de la faisabilité technique liée aux contraintes d'exploitation des équipements déjà en place. (cf. analyse financière)

Pour ce qui est du système raccordé au réseau électrique triphasé il permettra de couvrir 40% des besoins du schelter 1 (Glide) et de disposer d'énergie complémentaire pour l'alimentation d'autres équipements de la navigation aérienne, ce qui fera un gain prévisionnel de 33 180,97KWh par an, soit une économie de 3 450 820,88 FCFA. Cependant système ne

permettra pas de faire face à un éventuel défaut sur la ligne d'alimentation, le système ne fonctionnera que dans la journée.

Une analyse économique des systèmes étudiés permet de dégager deux types d'information : les coûts actualisés du générateur, et les coûts annuels qu'ils engendrent. Ces informations permettent à l'investisseur d'opérer un choix judicieux et rentable. Ainsi, ces coûts actualisés permettent à l'investisseur de comparer les coûts entre différentes options. Son importance est liée au fait que certaines options nécessitent de gros investissements de départ et des frais d'exploitation et de maintenance relativement faibles, alors que d'autres présentent la situation inverse.

Les coûts annuels de maintenance permettent d'assurer la pérennité de l'installation. Dans le cas du générateur photovoltaïque, ces coûts sont très faibles. Le choix de la durée de vie d'un système étant lié à la durée de vie maximale de son équipement principal⁶, le choix de la durée de vie économique est lié au fait que la durée de vie estimée des modules photovoltaïques est normalement de 20 ans.

Les autres paramètres importants qui ont été pris en compte dans l'analyse économique du système sont les taux d'intérêt, le taux d'investissement, le taux d'actualisation de la valeur future des différents coûts et le taux d'inflation.

Lorsque l'investissement initial est remboursé sur la durée de vie du système, les annuités sont calculées en fonction du remboursement du capital et de l'intérêt selon la formule suivante.

$$V_{\text{ann}} = \frac{V_{\text{init}} (1+i)^n \times i}{(1+i)^n - 1}$$

où

V_{ann} = la valeur de l'annuité

V_{init} = le coût initial de l'item

i = le taux d'intérêt bancaire

n = la durée de vie du système

⁶ **Le pompage photovoltaïque**, Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller, Bocar Sada Sy, 1998, ISBN 2 89481 006 7 IEPF, 56 rue St Pierre, Quebec G1K4A1, Canada

Ainsi, pour notre cas type, le coefficient d'annuité sur une durée de vie de 20 ans sera de :

$$\text{Coeff. annuité} = \frac{(1+i)^n \times i}{(1+i)^n - 1} = \frac{(1+0,1)^{20} \times 0,1}{(1+0,1)^{20} - 1} = 0,1175$$

Pour les frais ponctuels, on procède à une actualisation simple de la valeur présente de la composante pour l'année de la dépense. La formule ci-dessous permet de calculer la valeur actuelle de cette dépense par rapport au moment futur où elle sera effectuée.

$$V_{as} = V_{init} (1+t)^{-n}$$

où

V_{as} = la valeur actualisée simple de la composante

V_{init} = la valeur initiale de la composante

t = le taux d'actualisation

n = la durée de vie de la composante

La formule suivante permet de calculer la valeur actuelle des annuités et est appelée formule d'actualisation uniforme :

$$V_{au} = \frac{V_{ann} (1 - (1+t)^{-n})}{t}$$

où

V_{au} = la valeur actualisée uniforme de l'annuité

V_{ann} = la valeur initiale de l'annuité

t = le taux d'actualisation

n = la durée de vie du système

Les tableaux ci-après font la synthèse de cette analyse économique.

Tableau 6 : synthèse de l'analyse économique du système autonome.

calcul économique pour la durée de vie du système							
autonome							
durée de vie du système	20 ans			Ensoleillement		5,19KW/m2-j	
puissance du générateur P V	12880KWc						
production journalière d'énergie	100,8KW						
production annuelle d'énergie	36792KW						
capacité batterie	non Ah						
				monnaie		F CFA	
paramètres économiques							
1.taux d'intérêt (i)		10%					
2.taux d'investiss.(inv)		8%					
3.taux d'inflation (nf)		3%					
4.taux d'actualisation net		5%					
poste		durée de la période	valeur présente	coefficient pour annuité	coeff. Actual.simpl e	coeff.d'actua l. uniforme	valeur actualisée
		n	V	$i*(1+i)^n/((1+i)^n-1)$	$1/(1+i)^n$	$1-(1+i)^{-n}/i$	Va
					1	0	
1.coût initial							
coût des composants			147418894			1	0
<i>paiement unique</i>		0				1	0
<i>annuités</i>		20	17315768	0,11745962			12,4622103
transport et installation		0	3340000			1	3340000
2.exploitation et maintenance							
coût d'exploitation		20	395550				12,4622103
coût de maintenance		20	255450				12,4622103
autres coûts							
3.replacement(temps et transport)							
batterie		7	13417020			0,71068133	9535225,62
batterie		14	13417020			0,50506795	6776506,83
onduleur		7	7558372,5			0,71068133	5371594,22
onduleur		14	7558372,5			0,50506795	3817491,73
regulateur		7	11875000			0,71068133	8439340,8
regulateur		14	11875000			0,50506795	5997681,94
4.valeur de rachat							
-10%		20	-14741889,4			1	
coût actualisé		postes(1+2+3+4)					71181611,6
coût par WC		12880					5526,52264

Tableau 7 : synthèse de l'analyse économique du générateur couplé sur le réseau électrique BT triphasé ASECNA

Glide DME							
calcul économique pour la durée de vie du système							
durée de vie du système	20 ans			Ensoleillement		5,19KW/m2-j	
puissance du générateur P V	16800Wc						
production journalière d'énergie	78835Wh						
production annuelle d'énergie	28775 KWh						
capacité batterie	non Ah						
				monnaie		F CFA	
paramètres économiques							
1.taux d'intérêt (i)	10%						
2.taux d'investiss.(inv)	8%						
3.taux d'infation (nf)	3%						
4.taux d'actualisation net	5%						
poste		durée de la période	valeur présente	coefficient pour annuité	coeff. Actual.simpl e	coeff.d'actua l. uniforme	valeur actualisée
		n	V	$i*(1+i)^n/((1+i)^n-1)$	$1/(1+t)^n$	$1-(1+t)^{-n}/t$	Va
					1	0	
1.coût initial							
coût des composants			42878057,5			1	0
paiement unique		0				1	0
annuités		20	5036440,54	0,117459625		12,4622103	7372374,66
transport et installation		0	3340000			1	3340000
2.exploitation et maintenance							
coût de maintenance		0	255450			1	0
autres coûts							
3.remplacement(temps et transport)							
onduleur		7	2858354,5		0,71068133		2031379,18
onduleur		14	2858354,5		0,50506795		1443663,26
4.valeur de rachat							
-10%		20	-4287805,75		0,37688948		-1616028,89
coût actualisé		postes(1+2+3+4)					12571388,2
économie réalisée		20					14835208,64
coût actualisé							-2263820,44
coût par WC		16800					-134,751216

Chaque système a ses avantages et ses inconvénients et le choix peut se faire sur la base de critères techniques, financiers et économique.

Le système autonome avec batterie a l'avantage de couvrir les besoins énergétiques des trois shelters de jour comme de nuit, mais nécessite investissement très coûteux. Quant à celui connecté au réseau, bien que ne fonctionnant que le jour a plus d'avantages et convient mieux au contexte de l'ASECNA/Burkina. En effet, il permet de couvrir tous les besoins du shelter 1 dans la journée et d'alimenter d'autres équipements avec le surplus de production. Son coût d'investissement est faible.

En optant pour ce dernier système, l'ASECNA devra se doter d'un groupe électrogène diesel mobile pour faire face un éventuel défaut sur la ligne d'alimentation des shelters.

VII. CONCLUSION

La combinaison de générateurs solaires photovoltaïques au réseau électrique actuel de l'ASECNA/Ouaga lui permettra de subvenir à une partie de ses besoins en électricité, de faire des économies d'énergie de 33 180,97KWh/an, de réduire le coût de ses factures d'électricité en ayant recours au soleil, une source d'énergie abondante et renouvelable. L'ASECNA/Ouaga fera ainsi partie intégrante de la communauté des Agences qui utilisent les énergies renouvelables et participent ainsi concrètement à la protection de l'environnement et à l'avènement du développement durable.

La photovoltaïque constitue une voie de développement énergétique prometteuse : le rayonnement solaire qui atteint la terre en une heure représente une quantité d'énergie supérieure au total de l'énergie consommée par l'humanité en un an. La technologie nécessaire pour transformer ce rayonnement en électricité est de plus en plus performante. Les systèmes PV exigent peu d'entretien, sont simples d'utilisation, ne créent, à l'utilisation, aucune pollution (aucune émission, aucun bruit, aucun mouvement) et laissent une empreinte écologique minimale.

L'installation d'un générateur photovoltaïque permet de façon générale de disposer d'une source autonome d'énergie préférentielle en fonction du moment de la journée et de la puissance appelée. Dans le cas de l'ASECNA, l'utilisation de cette source énergétique non facturée permet de limiter la puissance appelée sur le réseau de distribution actuel, de mieux gérer le contrat d'abonnement SONABEL et de réduire les coûts globaux d'énergie.

Le générateur photovoltaïque s'impose donc comme la solution technique et économique pour l'alimentation en électricité des zones aéroportuaires surtout dans les pays membres de l'ASECNA où le potentiel solaire est très grand.

VIII. RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES

L'analyse faite dans le présent rapport donne des indicateurs pour une amélioration de la fourniture énergétique de l'ASECNA/Burkina. Pour accroître l'indépendance du Burkina Faso et particulièrement de multi national comme l'ASECNA, et lui permettre de mieux résister aux aléas dus aux changements climatiques dont les prévisions sont assez sévères pour les cinquante prochaines années, il est souhaitable :

- de prendre en compte, dans le court et moyen termes, les paramètres de suivi des indicateurs de changements climatiques sur le potentiel énergétique afin de mieux apprécier leurs effets sur l'économie, l'environnement, l'offre en énergie renouvelable et les conditions sociales des populations ;
- de développer l'utilisation des générateurs photovoltaïques en zone aéroportuaires afin de limiter les dépenses liées à l'utilisation des énergies fossiles et réduire les effets de la pollution.

Pour ce faire :

- intégrer le système PV dans les plans d'investissement énergétique de l'ASECNA ;
- prendre l'ASECNA/Burkina comme zone pilote pour l'expérimentation de ce système.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages et articles

Guide pratique du solaire photovoltaïque, Alain Liebard ,Jean Paul Louineau, Sylvain Charmay, Systèmes Solaires Septembre 2007

Le pompage photovoltaïque, Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller, Bocar Sada Sy ,1998, ISBN 2 89481 006 7 IEPF , 56 rue St Pierre, Quebec G1K4A1, Canada

Le pompage solaire photovoltaïque : manuel de maintenance, DICKO M., TAMBOURA M. et KEITA S Dangroup, Projet Danois-DRHE, Afritec, Mali, 1993.

Guide pratique d'analyse de projets Evaluation et choix des projets d'investissements
Bridier, Serge Michailf préface d'André BUSSERY ECONOMICA 5^e édition.

L'électricité solaire photovoltaïque, MOINE, G., Enelec, Mornant, France, 1981.

Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque Sylvain BRIGAND, 2008

Modules et systèmes photovoltaïques Alain Ricaud, Sept 2008

Une Méthode Simple pour Dimensionner les Installations Photovoltaïques', S. Labeled, 'PVSIZING, Congrès sur les Energies Renouvelables, la Maîtrise de l'Energie et l'Environnement, CEME'97, Biskra, pp. 25 – 30, 1997.

Conception et Réalisation d'un Logiciel de Dimensionnement des Installations Photovoltaïques', H. Belmili, A. Ayad et E.M. Berkouk ,Conférence Internationale des Energies Renouvelables et de Développement Durable, ICRESO'07, Tlemcen 21 - 25 Mai 2007.

Estimation du Rayonnement Solaire par deux Approches Semi Empiriques dans le Site de Biskra, A. Moummi, N. Hamani, N. Moummi et Z. Mokhtari Séminaire International sur la Physique Energétique, SIPE'8, Béchar, 2006.

The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications, J. Hofierka and M. Suri, In M. Ciolli and P. Zatelli (Eds), Proceedings Conference, 'Open Source

GIS-GRASS user's Conference 2002', Trento, Italy, September 11-13, 2002.

Textes de bases de l'OACI sur la Conception et exploitation technique des aérodromes

Le Choix des Investissements dans l'Entreprise, MOURGUES Nathalie, Economica, Paris, 1994

La production photovoltaïque d'électricité : quelles perspectives pour le Pays Provence Verte? Bernard FONTAINE Directeur de Recherche au CNRS Conseiller Municipal de Garéoult Secrétaire Général du Conseil de Développement du Pays Provence Verte

Exposé n°01 du cours ENER002 « Energies non conventionnelles » Bruxelles, 20 septembre 2005 **Professeur** : ir Michel Huartuillet 2009

Systèmes énergétiques : Vulnérabilité – Adaptation – Résilience (VAR) 2009 Rapport rédigé par : Joseph WETHE

Sites internet

http://www.ademe.fr/midi-pyrenees/a_2_04.html

<http://www.tecsol.fr>

<http://www.outilssolaires.com>

<http://www.institut-solaire.com>

NASA. Surface meteorology and Solar Energy Data Set (<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>)

ANNEXES

Annexe 1: BESOINS ENERGETIQUES

Besoins énergétiques

recepteurs	tension d'entrée U en V ac	intensité en A	quantité q	facteur de puissance (cos)	puissance nominale (W) ou ch $P_n = U \times I \times \cos\theta$	coefficient	puissance nominale totale en (W)	intensité en cc (A) I $= P/U_{inst}$	utilisation quotidienne Hu en(h/j)	énergie quot.cons. par Recpteur Eqc(Wh/j)
Ensemble chargeur	230	13	1	0,65	1943,5		1943,5	40,4895833	8	15548
climatiseur 1,5ch 230V AC/50Hz	230		2	0,78	1,5	736	2208	46	8	17664
2 réglettes fluo 2x36W	230		2	0,85	36	1,25	76,5	1,59375	1	76,5
baie mux fibre optique	230	4,3	1	0,8			791,2	16,4833333	8	6329,6
							5019,2	104,566667		
besoins totaux Bj										39618,1
tension l'installation Uinst en V										400

Annexe 2 : NOTE DE CALCULS DU GENERATEUR PV

Dimensionnement générateur PV

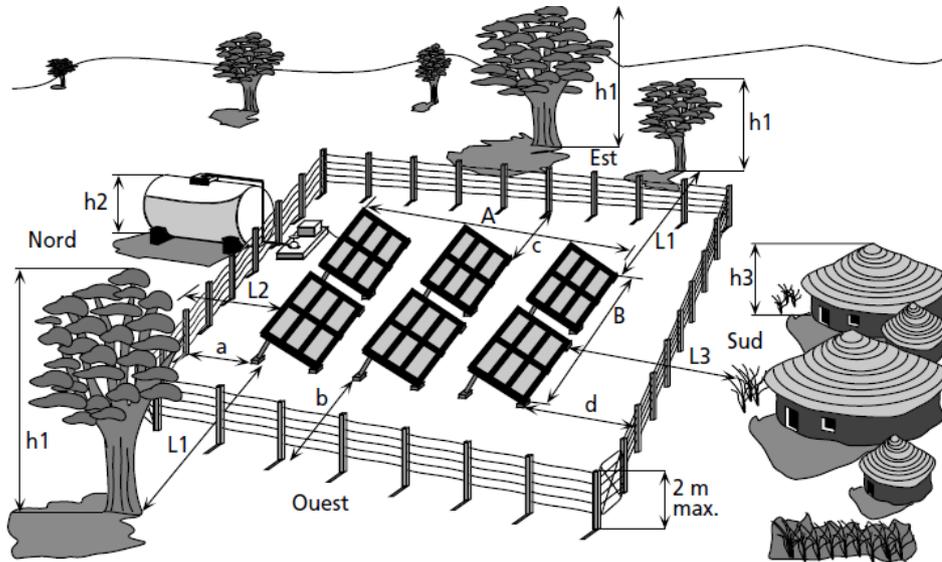
module utilisé 230Wc/29,2V								nombre de modules en serie =Usyst/ Umod		
	besoins totaux par jour $B_j = \sum E_{qc}$	Rb rendement Batterie	rendement énergétique du reste de l'installation Ri	ensoleillement moyen quotidien E_j en Kwh/m2	puissance crête calculée $P_{cal} = B_j / (R_b \times R_i \times E_j)$ en (Wc)	puissance $P_{mod}(wc)$	nombre de modules $NM = P_{cal} / P_{mod}$	quantité q	Puissance unitaire panneau $P_p = P_{mod} \times q$	nombre de panneaux solaires $N_p = P_{cal} / P_p$
	39618,1	0,7	0,85	5,19	12829,4879	240	53,45	13,24		3,81
valeur calculée arrondie							54	14	3220	4
installés							56			4
puissance crête installée P_c installée = $N_p \times P_p$							12,88Kwc			

Annexe 3 : NOTE DE CALCULS DE LA BATTERIE

Dimensionnement parc batterie de stockage.

batterie choisie à utiliser Batterie AGM 12V " Solar Bloc" 90Ah		Bj (Wh)	nombre d'autonomie Aut en jours	degré de décharge maxi autorisé (DD)	tension bateries installation Uinst en V	capacité minimale parc (Ah) Cmini=BjxAut/ (DDxU)	nombre de batterie en serie NBs		nombre de batteries associés parallèle NBp = Cmini/Pbs	nombre totale de batteries ntB=NBs x NBp
capacité de batterie utilisée Cb en Ah	tension batterie Ub en V				U inst		NBs= Uinst/Ub	puissance de batterie en serie Pbs=NBs x Cb en Ah		
90	12	39618,1	2	0,8	48	2063,4427	4	360	5,607181273	24
valeur arrondie							4		6	
capacité batterie parc de stockage									2160 Ah	

Annexe 4 : DISTANCES DES OBSTACLES



Distance des obstacles à l'ouest ou à l'est :
 $L_1 \geq 2 h_1$

Distances des obstacles au nord et au sud

Latitude	Nord	Sud
0 à 10°	$L_2 \geq 0,4 h_2$ ou ≥ 2 m	$L_3 \geq 0,7 h_3$
10 à 20°	$L_2 \geq 0,25 h_2$ ou ≥ 2 m	$L_3 \geq 1,0 h_3$
20 à 30°	$L_2 \geq 2$ m	$L_3 \geq 1,4 h_3$
30 à 40°	$L_2 \geq 2$ m	$L_3 \geq 2,0 h_3$
40 à 45°	$L_2 \geq 2$ m	$L_3 \geq 3,3 h_3$

Distances des clôtures
 (hauteur max. 2m)

a = 1 m	b = 2,5 m	c = 2,5 m
Latitude	d	
0 à 10°	0,9 m	
10 à 20°	1,3 m	
20 à 30°	1,9 m	
30 à 40°	2,8 m	

Annexe 5: exemple de calculs du générateur solaire photovoltaïque sur le réseau

Puissance du champ solaire à installé : $P_c = 16700W$

$P_p = 240w$

$N_m = P_c / P_p$

$N_m = 16700 / 240 = 69,58$ soit **70 modules**

Tension nominale de l'onduleur réseau : $U_{no} = 400V_{cc}$

Tension maxi module : $U_m = 30,2V_{cc}$

Nombre de modules en serie : $N_{ms} = U_{no} / U_m$

$N_{ms} = 400 / 30,2 = 13,24$ soit **14** modules

Puissance d'un panneau : $P_p = 14 \times 240 = \mathbf{3360W}$

Nombre de panneaux en parrallèles : $N_{p//} = P_c / P_p$

$N_{p//} = 16700 / 3360 = 4,97$ soit **5** panneaux de 3360w

Puissance installée : $P_{inst} = N_{p//} \times P_p = 5 \times 3360$

$P_{inst} = 16800W$

Puissance onduleur : $P_{ond} =$

Nominale = 15000w

Ration norm = $P_{ond} / P_{inst} = 15000 / 16800 = \mathbf{0,89}$