



**CONTRIBUTION DES ENERGIES RENOUVELABLES DANS L'OFFRE  
ENERGETIQUE DE LA SOCIETE NATIONALE D'ELECTRICITE DU BURKINA  
ET ETUDE DE CAS D'UNE  
CENTRALE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE DE 10MW RACCORDEE AU  
RESEAU A KAYA**

**MASTER SPECIALISE EN GENIE ELECTRIQUE ENERGETIQUE ET ENERGIES  
RENOUVELABLES OPTION ENERGIES RENOUVELABLES**

Présenté et soutenu publiquement le 27/Juin/2013 par

Jean Baptiste KY

Travaux dirigés par : Monsieur Paul COMPAORE

Ingénieur Electromécanicien/ Enseignant au 2iE

Et

Monsieur Lassané OUEDRAOGO

Cadre supérieur, Chargé de l'énergie à l'UEMOA

*Jury d'évaluation du stage :*

Président : Sayon SIDIBE

Membres et correcteurs : Madieumbe GAYE

Séverin TANO

**Promotion 2011/2012**

## DEDICACES

*Je dédie cette modeste œuvre à feu mon père KI Zamadou Laurent qui m'a inculqué le goût de l'effort et de la persévérance, à ma mère ainsi qu'à toute ma famille qui m'a soutenu tout au long de ce cheminement.*

## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont apporté des appuis multiformes pour la réalisation définitive du présent document.

Je remercie particulièrement Monsieur KI Apollinaire Siengui Directeur Général de la SONABEL structure sur laquelle a porté mon étude.

Je remercie Monsieur le Président de la commission de l'UEMOA pour m'avoir accueilli dans sa structure pour mon stage pratique en vue de la rédaction de ce document.

Je remercie tout particulièrement mon maître de stage et encadreur Monsieur Lassané OUEDRAOGO cadre supérieur chargé de l'énergie à LUEMOA pour sa constante disponibilité et son appui tout au long de ce travail.

Je remercie tout particulièrement mon Directeur de mémoire, Monsieur COMPAORE Paul Ingénieur électromécanicien, Chef de service étude\_mécanique,\_hydraulique, et énergies renouvelables la SONABEL.

Je remercie également tout le corps enseignant de l'Institut International de l'Environnement et de L'Eau qui a contribué à ma formation.

Au regard de l'aide inestimable qu'elles m'ont fourni, il y a des personnes dont je tiens particulièrement à mentionner les noms. Il s'agit de Monsieur Hamed COULIBALY, Directeur de la Production à la SONABEL, Monsieur Lassana ZOUNGRANA Chef de Département production hydroélectrique et énergies renouvelables, Monsieur Clément ZONGO Chargé des projets énergies Solaire, M. Roger OUEDRAOGO Ingénieur Electromécanicien tous à la SONABEL.

Enfin mes camarades de classe pour leur collaboration.

## RESUME

La contribution des énergies renouvelables dans l'offre énergétique de la SONABEL est à ce jour faible. Nous avons seulement l'hydroélectricité qui contribue pour seulement 8,5% de l'approvisionnement total en 2012. A travers ce développement nous montrons les avantages et inconvénients des modes de production thermique, hydroélectrique, solaire, ce qui nous permettra de prendre l'option pour une plus grande contribution des énergies renouvelables et la réduction du mode de production thermiques. Cette option a été prise au regard des multiples inconvénients de la production thermiques et des avantages que nous avons à nous orienter vers l'hydroélectricité et surtout le solaire. L'existence d'un potentiel considérable pour l'hydroélectricité et le solaire; la préservation de l'environnement pour les générations présentes et futures par l'utilisation d'énergies non ou peu polluantes, la volonté de tendre vers l'indépendance énergétique de nos états sont autant de raisons qui nous amènent à plaider pour un mix énergétique à travers une combinaison rationnelle de la source hydroélectrique, solaire et de l'énergie importée. L'étude de cas de la centrale solaire photovoltaïque de 10MW raccordé au réseau et les simulations faite, nous permet de montrer pratiquement comment produire de l'énergie solaire photovoltaïque et la possibilité de son intégration dans le bouquet énergétique existant écoulé a travers le réseau national interconnecté. Nos propositions et recommandations nous conduisent à monter la nécessité de l'accroissement de la part des énergies renouvelables dans l'offre énergétique de la SONABEL. De ce fait nous suggérons la prise de mesures idoines en vues de vulgariser l'énergie solaire par la construction de centrales solaires raccordées au réseau en vue de la mutualisation des coûts de réalisation par l'ajout de centrales sur les sites des autre types de production. L'augmentation substantielle des énergies renouvelables nous permettra à terme de tendre vers notre l'indépendance énergétique, tout en utilisant des sources d'énergies propres et respectueuses de l'environnement.

### Mots Clés :

**1 –Energies renouvelables**

**2 –Mix énergétique**

**3 –Ressources locales**

**4 - Environnement**

**5 –Hydroélectricité**

## ABSTRACT

The contribution of renewable energy supply by the SONABEL is still low. We only have hydropower, which has contributed for only 8.5% of total supply in 2012. This development shows the advantages and disadvantages of the method of thermal generation, hydro, solar, which will allow us to take the option for a greater contribution of renewable energy and thus reduce the thermal production method. This option was taken by comparing the multiple disadvantages of thermal production with the benefits that we will get by moving towards hydropower and especially solar energy. The availability of renewable resources such as solar and hydro, the preservation of the environment for present and future generations through the use of zero and low emission energy, the will to move towards energy independence of our states are the reasons that lead us to advocate for mix energy through a rational combination of hydraulic energy, solar and imported energy. The case study of the 10MW solar photovoltaic grid-connected and simulations done, allow us to show how to produce photovoltaic solar energy and the possibility of integration in the existing energy through the national network interconnected. Our proposals and recommendations lead us to show the need for increasing the input of renewable energy in the energy supply of SONABEL. Therefore, we suggest taking the appropriate measures in order to popularize solar energy by building solar power plants connected to the network so as to share the implementation costs by adding plants on the sites other types of production. The substantial increase in renewable energy will finally allow us to move towards energy independence, while using clean sources of energy and respecting the environment.

Keywords:

**1-renewable energy**

**2-Mix energy**

**3-Local Resources**

**4-Environment**

**5-Hydropower**

## LISTE DES ABREVIATIONS

<b>AFD</b>	:	Agence française de développement
<b>AIE</b>	:	Agence Internationale de l'Energie
<b>BT</b>	:	Basse Tension
<b>C</b>	:	Carbone
<b>CEDEAO</b>	:	Communauté Economique des Etats de l'Afrique de l'Ouest
<b>CEMAC</b>	:	Communauté économique des états de l'Afrique centrale
<b>CH<sub>4</sub></b>	:	Méthane
<b>CILSS</b>	:	Comité inter-état de lutte contre la sècheresse au sahel
<b>CO<sub>2</sub></b>	:	Dioxyde de carbone
<b>COOPEL</b>	:	Coopérative d'Electricité
<b>CRCO</b>	:	Centre Régional de Consommation de Ouagadougou
<b>DDO</b>	:	Distillant Diesel Oil
<b>DGE</b>	:	Direction Générale de l'Energie
<b>EDF</b>	:	Electricité de France
<b>FDE</b>	:	Fond de Développement de l'Electrification
<b>FMI</b>	:	Fond Monétaire International
<b>FFO</b>	:	Fuel-oil
<b>HT</b>	:	Haute Tension
<b>H<sub>2</sub>O</b>	:	eau
<b>INSD</b>	:	Institut National de la Statistique et de la Démographie
<b>kV</b>	:	Kilovolt
<b>kVA</b>	:	kVA
<b>kWh</b>	:	Kilowatt heure
<b>MEPRED:</b>		Mainstreaming Energy for Poverty Reduction and Economic Development

<b>MW</b>	:	Mégawatt
<b>MWh</b>	:	Mégawattheure
<b>MWc</b>	:	Mégawattcrête
<b>PEC</b>	:	Politique énergétique commune
<b>PIB</b>	:	Produit Intérieur Brut
<b>PNE</b>	:	Plan National d'Electrification
<b>PNUD</b>	:	Programme des Nations Unis pour le Développement
<b>PRS</b>	:	Programme régional solaire
<b>PV</b>	:	Photovoltaïque
<b>QIBB</b>	:	Questionnaire des Indicateurs de Base de Bien-être.
<b>SCADD:</b>		Stratégie de Croissance Accélérée pour le Développement Durable.
<b>RNI</b>	:	Réseau national interconnecté
<b>SEMAFO</b>	:	Société d'exploitation minière de l'Afrique de l'Ouest.
<b>SONABEL</b>	:	Société Nationale d'Electricité du Burkina.
<b>UEMOA</b>	:	Union Economique et Monétaire Ouest Africaine.
<b>WAPP</b>	:	West African Power Pool.

## TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION .....	1
<b>I-GENERALITE SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES .....</b>	<b>4</b>
<b>I.1. L'énergie solaire.....</b>	<b>4</b>
<b>I.1.1.Le solaire thermique .....</b>	<b>5</b>
<b>I.1.2. Le solaire photovoltaïque .....</b>	<b>6</b>
<b>I.2. L'énergie éolienne .....</b>	<b>7</b>
<b>I.3. L'énergie géothermique .....</b>	<b>8</b>
<b>I.5. La biomasse.....</b>	<b>10</b>
<b>I.6. L'Énergie des mers .....</b>	<b>12</b>
<b>II- ETAT DES LIEUX DE LA PRODUCTION DE LA SONABEL.....</b>	<b>13</b>
<b>II.1. Caractéristique de la production thermique .....</b>	<b>13</b>
<b>II.2. Caractéristique de la production hydroélectrique.....</b>	<b>14</b>
Source : par l'auteur à partir des données du tableau .....	16
<b>II.3. L'énergie importée .....</b>	<b>16</b>
<b>II.4. La production des énergies renouvelables .....</b>	<b>17</b>
<b>II.5. Récapitulatifs des énergies produites et importée par la SONABEL.....</b>	<b>17</b>
<b>III. ANALYSE COMPARATIVES DES SOURCES DE PRODUCTION D'ENERGIES.....</b>	<b>20</b>
<b>III.1. Avantages et inconvénients des ressources thermiques .....</b>	<b>20</b>
<b>III.3. Avantages et inconvénient de la ressource solaire.....</b>	<b>22</b>
<b>III.4. Synthèse et choix .....</b>	<b>23</b>
<b>IV. FOCUS SUR LE MODE DE PRODUCTION SOLAIRE .....</b>	<b>24</b>
<b>IV. 1 Justification du choix d'implantation .....</b>	<b>24</b>
<b>IV.2 Aperçu sur les types de centrales solaires photovoltaïques.....</b>	<b>27</b>
<b>IV.3 La technologie d'installation de la centrale solaire et élément de coût d'installation. .</b>	<b>28</b>
<b>IV. 4 Injection de la production solaire sur le réseau et étude de stabilité .....</b>	<b>37</b>
<b>IV.4.1 Point d'injection de la production sur le RNI.....</b>	<b>37</b>
<b>IV.4.2 Stabilité du réseau et problème d'exploitation .....</b>	<b>40</b>
<b>V. PERSPECTIVES DE LA SONABEL.....</b>	<b>42</b>
<b>V.1. Le Thermique .....</b>	<b>42</b>
<b>V.2. L'hydroélectricité .....</b>	<b>42</b>
<b>V.3. Le solaire.....</b>	<b>42</b>
<b>V.4. La biomasse .....</b>	<b>43</b>

V.5. L'importation d'énergie .....	43
<b>VI. PROPOSITIONS ET RECOMMANDATIONS POUR LE DEVELOPPEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES .....</b>	<b>45</b>
VI.1. Pourquoi développer les énergies renouvelables ? .....	45
VI.1.1. Les raisons environnementales et éthiques pour le Burkina Faso .....	45
VI.1.2. Les raisons économiques et financières .....	46
VI.1.3. La disponibilité de la ressource .....	46
VI.2. Propositions et recommandations .....	50
CONCLUSION .....	53
BIBLIOGRAPHIE .....	54

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques du parc de machine des barrages hydroélectriques .....	16
Tableau 2 : Caractéristiques générales de la centrale solaire de Zagtouli .....	17
Tableau 3 : L'énergie produite et importée en 2012.....	17
Tableau 4 : tableau des caractéristiques de la ressource thermique. ....	20
Tableau 5 : tableau des caractéristiques de la ressource hydroélectrique.....	21
Tableau 6: tableau des caractéristiques de la ressource solaire.....	22
Tableau 7 : Tableaux récapitulatif des sites .....	47

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Illustration des utilisations du rayonnement solaire .....	5
Figure 2 : Illustration de plaques solaires photovoltaïque .....	7
Figure 3 : Installation d'énergie éolienne .....	8
Figure 6 : Illustration de la biomasse .....	11
Figure 9 : Part de chaque barrage dans la production hydroélectrique totale .....	16
Figure 10 : Part de chaque type d'énergie dans l'offre totale de la SONABEL .....	18
Figure 11 : Evolution du prix des modules en €/Wc .....	23

## INTRODUCTION

L'énergie est un facteur indispensable au développement. L'économie industrielle repose sur son utilisation massive. Son utilisation augmente au fur et à mesure que l'homme cherche à améliorer ses conditions d'existence, son confort, son développement. On comprend alors que les besoins énergétiques s'accroissent sans cesse et l'énergie réclamée en quantité toujours plus importante dans tous les domaines : industriel, artisanal, commercial, agricole, domestique. Pour illustration, citons J. Apertet dans son ouvrage « De nouvelles sources d'énergies pour les pays insuffisamment développés », *« Depuis cent cinquante ans l'énergie constitue une des conditions techniques fondamentales du développement de la civilisation industrielle. Un pays qui consomme peu d'énergie est un pays sous développé et subordonné par conséquent à d'autres économies »*.

Le Burkina Faso s'inscrit dans cette logique de croissance étant donné l'importance de l'énergie et tout particulièrement l'énergie électrique pour le fonctionnement des unités industrielles et commerciales et aux autres secteurs de l'économie nationale. Au regard du taux de croissance démographique et du développement des activités économiques, les besoins énergétiques du Burkina Faso ne feront que croître au fil des ans<sup>1</sup>.

L'approvisionnement du Burkina Faso en énergie électrique est assuré par

- un parc de production thermique Diesel (46,3% de la production en 2012) dont les équipements ont du mal à faire face à des sollicitations de plus en plus contraignantes du fait de l'accroissement de la demande;
- un parc de production hydroélectrique d'importance relativement faible (8,5% de la production en 2012) qui reste assujéti aux aléas de la pluviométrie annuelle. Il s'agit de Bagré, Komienga, Tourni et Niofila;
- L'importation de l'énergie électrique à partir de la Côte d'Ivoire, du Ghana, et du Togo (45,2 % de la production en 2012).

Le profil et l'évolution de la demande en énergie électrique au Burkina Faso se caractérise par :

- une forte pointe dite « grande Pointe » en période de forte chaleur (de mars à mai soit trois (03) mois dans l'année) ;
- une pointe modérée dite « petite pointe » en octobre – novembre de chaque année ;

---

<sup>1</sup> Note sectorielle énergie BF

- une forte croissance annuelle de la demande (près de 10% en moyenne par an, entraînant un doublement de la pointe presque tous les sept (07) ans).

A l'instar de la quasi-totalité des pays de la sous-région, l'approvisionnement du Burkina Faso en énergie électrique en quantité suffisante et au moindre coût demeure le défi majeur à relever pour asseoir les bases solides d'un développement économique et social durable du pays.

Afin de venir à bout de la double problématique "Quantité – Coût" de l'énergie électrique et tenant compte des conclusions des études menées avec l'appui des Partenaires Techniques et Financiers, le Gouvernement a opté pour une stratégie d'approvisionnement qui s'appuie sur :

- le renforcement et le renouvellement progressif du parc de production thermique diesel en vue d'assurer un minimum de sécurité et d'autonomie en matière d'approvisionnement en énergie électrique ;
- le développement des interconnexions avec les pays voisins disposant de ressources énergétiques moins onéreuses. Il s'agit notamment des interconnexions avec la Côte d'Ivoire, le Ghana et le Nigeria à travers le Niger ;
- la création d'un réseau national interconnecté par :
  - la construction des lignes d'interconnexion reliant les trois (03) centres régionaux de consommation. Il s'agit des interconnexions Bobo-Dioulasso - Ouagadougou et Ouagadougou - Ouahigouya;
  - le raccordement progressif de tous les centres isolés au réseau des centres principaux voisins.
  - le développement des énergies renouvelables et notamment l'énergie solaire.

C'est dans la droite ligne de cette stratégie que nous nous sommes proposé de réfléchir sur le thème : « Contribution des énergies renouvelables dans l'offre énergétique de la SONABEL et étude d'installation d'une centrale solaire photovoltaïque de 10MW à Kaya »

Dans cette réflexion notre objectif principal est de montrer la nécessité de tendre de plus en plus vers le mix-énergétique en introduisant des sources d'énergies renouvelables et durables avec pour but de gagner en coût, de réduire la dépendance énergétique de nos pays, de permettre l'accès de tous à l'énergie électrique et de respecter nos engagements vis-à-vis de l'environnement à travers la politique environnementale adoptée en 2004.

Pour cerner au mieux ce thème nous avons choisi de l'aborder en cinq principales parties dont une introduction et une conclusion.

- la première partie fait un aperçu théorique sur les énergies renouvelables notamment les généralités sur les énergies renouvelables ;
- la deuxième partie présente la situation actuelle de la SONABEL c'est-à-dire le profil énergétique actuel ;
- la troisième partie fait une analyse comparative des différents modes de production en mettant en relief les avantages et inconvénients de celles-ci ;
- la quatrième partie est consacrée à l'étude d'installation d'une centrale solaire photovoltaïque de 10 MWc à Kaya et l'injection de la production dans le réseau national interconnecté
- la cinquième partie aborde les perspectives de la SONABEL.
- la sixième partie est une proposition sous forme de conclusion et de plan d'action pour un mix-énergétique conséquent dans la matrice de production électrique de la SONABEL et un appel à l'orientation vers la prise en compte des énergies renouvelables en conformité avec les nouvelles orientations politiques en matière d'énergie du Burkina Faso.

# I-GENERALITE SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

Etymologiquement le mot «énergie» vient du grec «ergos» signifiant «travail».

L'énergie est une grandeur caractérisant un système et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il entre en interaction.

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humaine. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique).

Dans cette partie nous allons nous atteler à définir les différents types d'énergies renouvelables qui existe avant de développer les sources d'énergie qui nous intéresse dans le contexte de la SONABEL.

## I.1. L'énergie solaire

Elle est due au rayonnement électromagnétique du soleil. De toutes les sources d'énergie disponibles sur terre, seules trois ne sont pas d'origine solaire à savoir la géothermie, l'énergie nucléaire et l'énergie marée motrice.

Tout le reste provient directement ou indirectement de l'énergie solaire. Le flux thermique solaire sur terre est de  $1400 \text{ W/m}^2$  hors atmosphère,  $200 \text{ W/m}^2$  en moyenne au sol, de  $800$  à  $1000 \text{ W/m}^2$  à l'équateur et aux tropiques. Cela représente une énergie de  $4, 5$  à  $6 \text{ Wh/m}^2/\text{jour}^2$ .

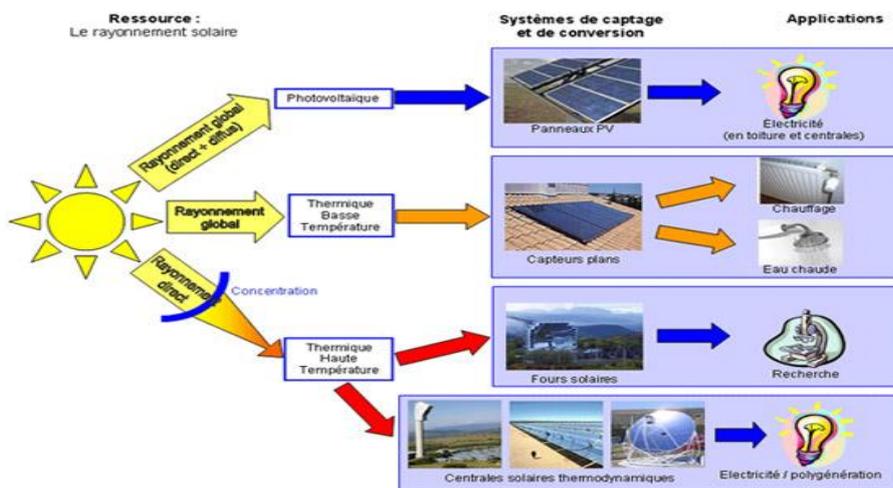
L'énergie solaire est utilisé principalement pour les centrales solaires à concentration, Les capteurs plans à effet de serre (chauffages, séchage...) La conversion photovoltaïque en électricité.

Le schéma ci-dessous résume ses différentes applications. Dans le développement qui suivra nous allons nous pencher sur les deux principales utilisations que sont le solaire thermique et le solaire photovoltaïque.

---

<sup>2</sup> Cours 2iE, prof Y. COULIBALY

Figure 1 : Illustration des utilisations du rayonnement solaire



Source : CNRS Héli odyssee

### **I.1.1. Le solaire thermique**

L'Énergie solaire thermique est la production de chaleur, par conversion de l'énergie contenue dans le rayonnement solaire, très rentable pour le chauffage dans les régions ensoleillées.

Il existe aujourd'hui 3 types de technologies solaires à concentration qui ont toutes atteint un haut niveau de maturité pour la production d'électricité. Ce sont :

- les collecteurs cylindro-paraboliques.
- les systèmes à héliostats orientés vers une tour à récepteur central ;
- les paraboles à foyer mobile.

Ces systèmes solaires produisent donc de la chaleur qu'ils convertissent en électricité au moyen de cycles thermodynamiques conventionnels.

Des travaux conduits depuis près de 30 ans par des organismes de recherche publics ou semi-publics aux USA, en Israël, en Allemagne et en Espagne ont permis d'améliorer les composants des centrales solaires et ont contribué à faire baisser régulièrement les coûts des installations et à accroître leur efficacité énergétique<sup>3</sup>.

<sup>3</sup>wikipedia

A travers le monde, d'importantes centrales électro solaires industrielles sont déjà réalisées ou en cours de mise en œuvre dans chacune des trois filières de concentration du rayonnement solaire.

Du point de vue environnemental et notamment la nécessité de réduction des émissions de gaz à effet de serre, les technologies solaires à concentration génèrent un taux d'émission estimé inférieur à 20 kgCO<sub>2</sub>/mWh contre 900 kgCO<sub>2</sub>/mWh pour l'électricité issue de la combustion du charbon.

Les pays sahélo sahéliens dont le Burkina possède un avantage comparatif naturel dans l'adoption de cette technologie. Les collecteurs solaires n'utilisant que la composante dite directe du rayonnement solaire, c'est dans la ceinture sahélo saharienne que le rayonnement direct est le plus intense; il y atteint 2900 kWh/m<sup>2</sup>/an. Le sahel et le Sahara fournissent donc largement la surface nécessaire à une production massive d'énergie électrique, d'hydrogène et d'eau par les technologies à concentration.

La ressource solaire n'est pas le seul élément de sélection des sites potentiels d'implantation de centrales solaires. Des études détaillées pourraient être conduites afin de mieux évaluer le potentiel et l'emplacement optimal des technologies solaires à concentration pour la production d'électricité.

Du point de vue investissement, les coûts de production d'électricité par les centrales solaires à concentration sont dans une fourchette de 0,12 €/kW à 0,30 €/kW. Les perspectives de réduction situent le coût du kWh autour de 0,06 € à l'horizon 2015.<sup>4</sup>

### **I.1.2. Le solaire photovoltaïque**

L'Énergie photovoltaïque est la production d'électricité à partir de la lumière, notamment à l'aide de panneaux solaires.

Aujourd'hui deux technologies dominent le marché : les modules au silicium cristallin et les modules en couches minces. Les modules à base de silicium cristallin occupent plus de 85% du marché mondial du fait de leur rendement élevé. Les recherches effectuées<sup>5</sup> ont permis d'affirmer que :

- La technologie cristalline représente encore plus de 80% du marché ;
- La plus grande part du marché est toujours concentrée en Europe avec 73% du marché mondiale.

<sup>4</sup> Etude UEMOA publié par M. Lassané OUEDRAOGO cadre supérieur chargé de l'énergie UEMOA

<sup>5</sup> Etude UEMOA

- La plus grande centrale en service dans le monde a une puissance de 60 mWc
- Cette technologie a atteint un niveau de maturité technique avéré.

Du point de vue emplacement, il a été défini les critères de choix des emplacements optimaux des installations qui tiennent compte du niveau d'ensoleillement, de l'espace existant, de l'existence et de la disponibilité de poste sources, des impacts environnementaux, de la productivité possible des équipements.

Le produit ainsi obtenu devra être complété par la définition de gammes d'équipements à installer mais aussi la rentabilité économique des différentes gammes déclinée en termes de coût global actualisé de chacune des gammes mais aussi de l'estimation de l'amortissement prévisionnel de ces gammes.

Dans le contexte de notre pays la ressource solaire est très abondante et constitue de ce point de vue un avantage naturel. Cette technologie fait l'objet de notre choix et sera approfondi à travers le dimensionnement et l'installation d'une centrale solaire photovoltaïque de 10MWc à installer à Kaya.

Figure 2 : Illustration de plaques solaires photovoltaïques



Plaque solaire photovoltaïque

## **I.2. L'énergie éolienne<sup>6</sup>**

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. Elle peut être utilisée de deux manières : de manière directe et indirecte.

<sup>6</sup>[www.techno-science.net](http://www.techno-science.net)

Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule par exemple un navire à voile ou char à voile, pour pomper de l'eau comme dans le cas des éoliennes de pompage pour abreuver le bétail, ou pour faire tourner la meule d'un moulin.

Transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer un courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint par exemple un groupe électrogène et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie. Son fonctionnement est simple et s'inspire de la technologie des moulins à vent.

Cette technologie bien que présente dans certaines contrées africaines est peu répandue en Afrique et inexistante dans notre pays en raison de la vitesse et l'intensité des vents en général faibles. Cet état de fait ne permet pas son utilisation pour une production d'énergie à grande échelle.

Figure 3 : Installation d'énergie éolienne



Sources : techno-sciences

### **I.3. L'énergie géothermique**

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. La plus grande partie de la chaleur de la terre est produite par la radioactivité naturelle des roches qui constituent la croûte

terrestre. C'est l'énergie nucléaire produite par la désintégration de l'uranium, du thorium et du potassium. La température de la terre varie avec la profondeur dans le sol.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années. Cette technologie est déjà présente en Europe notamment en Italie mais pas encore expérimentée en Afrique encore moins au Burkina Faso en raison de la non maîtrise de la technologie et de l'investissement élevé.

#### **I.4. L'énergie hydroélectrique**

C'est le processus de transformation de l'énergie potentielle de l'eau d'un barrage en énergie mécanique puis électrique. La puissance mécanique disponible ( $P = \rho g Q H$ ) à laquelle il faut appliquer un rendement global de l'installation voisin de 0,8.

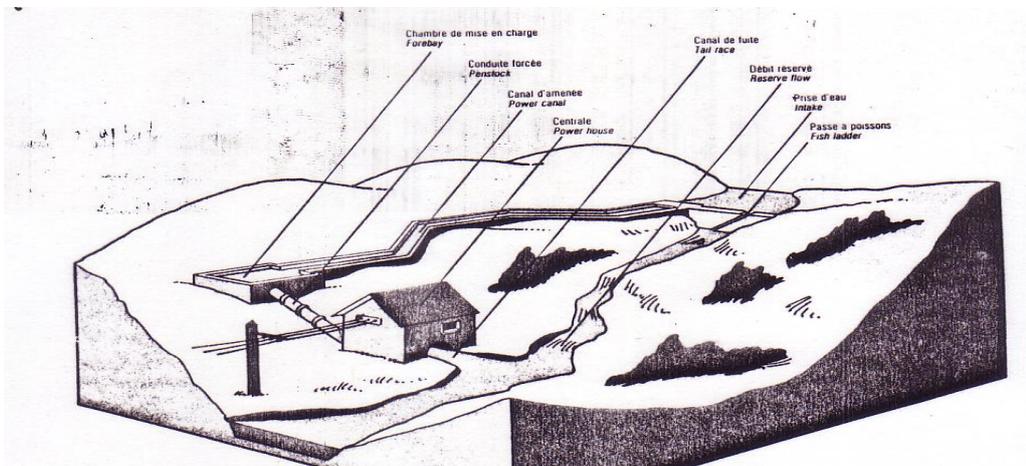
Finalement la puissance électrique disponible dans un barrage hydroélectrique peut-être estimée par  $P = 8 Q H \text{ kW}$

- Q est le débit en m<sup>3</sup>/h
- H est la hauteur de chute en m

On évalue de la même façon l'énergie électrique disponible dans un barrage ou sa productivité par  $E_e = P T$  en kWh.

L'hydroélectricité constitue de nos jours la plus grosse part en termes d'énergie renouvelable dans l'offre énergétique de la SONABEL. En plus d'un potentiel important et d'une technologie déjà maîtrisée elle reste une ressource indispensable pour l'avenir énergétique de notre pays.

Figure 4 : Illustration d'une installation hydroélectrique



Sources : techno-sciences

## I.5. La biomasse

La biomasse représente l'ensemble de la matière organique, qu'elle soit d'origine végétale ou animale. Elle peut être issue de forêts, milieux marins et aquatiques, haies, parcs et jardins, industries générant des coproduits, des déchets organiques ou des effluents d'élevage. Cette matière organique est la matière qui compose les êtres vivants et leurs résidus ayant pour particularité d'être toujours composée de carbone (du bois aux feuilles en passant par la paille, les déchets alimentaires, le fumier...). Bref, une source d'énergie tirée de ce qui pousse et de ce qui vit. C'est toute la matière organique fournie par photosynthèse.

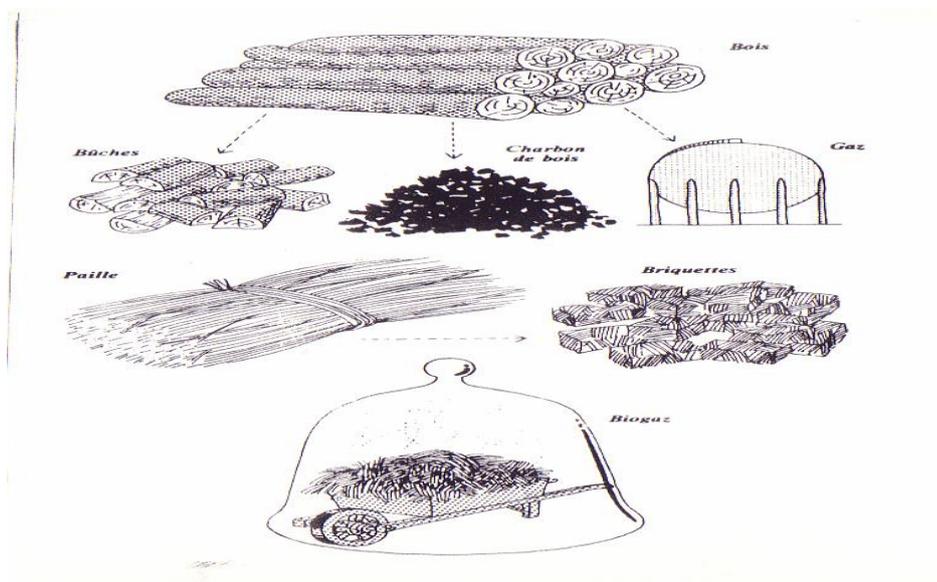
La biomasse et principalement le bois est utilisée depuis l'antiquité par combustion pour la cuisson, le chauffage, l'éclairage...

A partir de la biomasse on peut fabriquer des combustibles modernes gazeux, liquides ou solides de forte densité.

Le pouvoir calorifique de la biomasse est de l'ordre de 4000 kcal/kg à comparer à celle de l'essence qui est de 11 000 kcal/kg.

Le charbon de bois qui est de la biomasse densifiée peut atteindre un PCI de 8000 kcal/kg

Figure 5 : Illustration de la biomasse



Sources : techno-sciences

La biomasse peut être valorisée en combustion directe pour les chaudières, foyers améliorés, huile comme biocarburant...

Elle peut être transformée de diverses manières pour en faire un combustible moderne : Alcool, biogaz, biodiesel c'est-à-dire les biocarburants de première génération.

Dans un futur proche on prévoit une transformation de la biomasse pour remplacer les produits pétroliers par divers procédés encore au stade de l'étude en laboratoire pour obtenir des biocarburants de seconde génération

La biomasse est une ressource disponible dans notre pays à vocation essentiellement agricole. Toutefois son utilisation à des fins de production d'électricité n'est pas encore très efficace en termes de rendement surtout au niveau industriel pour l'électricité.

## **I.6. L'Énergie des mers**

On distingue 5 types d'énergie liés à la mer : L'énergie marée motrice, celle des marées ; L'énergie des vagues ou de la houle ; L'énergie hydrolienne, celle des courants marins ; L'énergie du gradient thermique des mers ; L'énergie de la biomasse algale.

La mer recèle une source d'énergie considérable du fait qu'il existe une différence entre la température des eaux superficielles et la température des eaux en profondeur. Malheureusement cette différence reste toujours faible et ce n'est que dans les régions tropicales et équatoriales, et en bordure des mers profondes, que l'on peut disposer d'un écart suffisant pour produire de l'énergie. En outre notre pays ne possédant pas de mer ce type d'énergie ne fait peut faire partie de nos choix

Dans cette partie nous avons fait un tour d'horizon sur les énergies renouvelables afin de nous familiariser avec ce type d'énergies et nous permettre par la suite d'éclairer et justifier nos choix. Compte tenu de l'utilisation des énergies thermique et de l'hydroélectricité dans le contexte actuel de la SONABEL, et des projets dont la mise en œuvre est imminente dans le domaine de l'énergie photovoltaïque, dans la suite de notre étude nous allons nous étaler beaucoup plus largement sur ces trois filières.

## **II- ETAT DES LIEUX DE LA PRODUCTION DE LA SONABEL**

Dans cette partie nous allons parcourir les différentes sources de production existantes de nos jours. Il s'agit de la production thermique, hydroélectrique et des énergies renouvelables tels que la biomasse et l'énergie solaire. Nous ferons également le récapitulatif de toutes les énergies les plus significatives produites par source.

### **II.1. Caractéristique de la production thermique**

Il s'agit de la production d'origine thermique utilisant le fuel ou le DDO comme matière de base. Elle a toujours été la source traditionnelle d'approvisionnement et occupe encore la plus grosse part dans la production d'énergie électrique au Burkina Faso. En 2009 elle représentait 67% de la production totale<sup>7</sup>. Toutefois sa part se réduit proportionnellement au fur et à mesure par rapport aux importations pour 2 raisons essentielles à savoir le coût de production élevé et la possibilité d'effectuer des interconnexions entre pays de la sous-région. Elle représente seulement 46,3% en 2012.

Les principaux problèmes relevés au niveau de la production thermique sont de plusieurs ordres

Le coût du kilowattheure est élevé donc non compétitif. Ceci s'explique par le fait que :

- Les groupes thermiques consomment d'importante quantité de combustibles et de lubrifiants. Le pays ne produisant pas de pétrole est obligé de l'acheter cher à l'extérieur en se conformant aux fluctuations du coût sur le marché international.
- La situation géographique du pays marqué par son éloignement de la mer engendre des coûts supplémentaires en termes de transport.
- Le mode de fonctionnement des groupes thermiques diesel favorise l'usure des pièces entraînant une consommation importante de pièce de rechange élevant ainsi le coût de maintenance.
- L'encombrement dû à la taille des équipements oblige à la construction de locaux assez vaste pour les contenir ce qui occasionne des coûts.

---

<sup>7</sup> Rapport annuel 2010 de la SONABEL

- La puissance unitaire des groupes est faible, ce qui nécessite l'implantation de plusieurs machines pour avoir une puissance substantielle pour la centrale. Cette situation aggravée par le fait que dans certaines centrales les groupes ne sont pas de même marque et de la même technologie entraîne des difficultés d'exploitation et de maintenance. Cela impose la nécessité d'avoir un personnel nombreux pour l'exploitation de la centrale et les frais de formation y afférant et l'acquisition d'un stock plus important de pièces de rechanges pour palier à d'éventuelles pannes.
- Du point de vue environnemental ce mode de production entraîne différents types de problèmes dont le bruit, la fumée d'où émission de CO, la pollution des sols aux hydrocarbures, un environnement de travail chaud et parfois explosif à cause des combustibles.

Au regard du tableau du parc de production en annexe 8 nous remarquons qu'il comprend beaucoup de groupe vétustes. Sur 34 groupes installés dans les principales centrales de production de la SONABEL 23 ont été mis en service il ya plus de 10 ans. C'est donc dire que le parc est d'une façon générale vieillissant avec ce que cela peut engendrer comme coût d'entretien plus élevés pour de faibles puissances en retour.

### **Production des centrales thermiques**

Pour palier au déficit de production, la SONABEL a fait recours à des centrales de location avec les sociétés APR et GPS. Avec le parc de production existant, nous avons une puissance installée totale de 206 318 kVA en 2011. Pour avoir la production thermique totale il faudrait ajouter la puissance des centrales de location qui s'élève à 68 434 kVA. Ce qui nous donne une puissance installée totale de 274 752 kVa pour une production totale de 448 322 186 kWh. Nous avons tenue à séparer la production des centrales de location parce qu'il s'agit d'une situation temporaire qui pourrait ne pas exister l'année suivante en raison de la possibilité de rupture des contrats avec les sociétés APR et GPS. Cette production représente la plus grosse part dans l'approvisionnement total en énergie de la SONABEL.

## **II.2. Caractéristique de la production hydroélectrique**

Comme précisé dans les généralités il s'agit de l'utilisation de l'eau pour la production d'électricité. Le Burkina Faso compte quatre barrages hydroélectriques qui apportent une production en 2011 de **81 949 439 kWh** soit un pourcentage de 15,45% de la production totale et 8,5% en 2012.

La production hydroélectrique est tributaire des aléas climatiques d'ou son évolution en dent de scie d'une année à une autre en fonction de la pluviométrie de l'année.

Du point de vue technologie deux principaux types de turbines sont utilisés. Nous avons :

La Turbine Francis : C'est une turbine adaptée aux chutes moyennes ( $30 \text{ m} < h < 300 \text{ m}$ ) et dont la roue comporte un certain nombre d'aubes fixes serrées entre le plafond et la ceinture. Elle est alimentée en eau par sa périphérie, au moyen d'une tuyauterie enroulée en colimaçon, la bêche spirale. Entre la bêche et la roue, des aubes directrices permettent de régler le débit et dirigent l'eau convenablement sur la roue. L'écoulement dans une turbine Francis est centripète. C'est une turbine à réaction parce que le mouvement de la roue est dû à une déviation des filets fluides et non pas à un choc. C'est une turbine à injection totale parce qu'elle est alimentée sur toute sa périphérie. La régulation de puissance se fait par celle du débit d'eau qui arrive sur la roue et cette fonction est assurée par les directrices manœuvrées par le cercle de vannage.

La Turbine Kaplan : C'est une turbine adaptée aux basses chutes moyennes ( $h < 30 \text{ m}$ ) et dont la roue est constituée d'un moyeu sur lequel sont disposées des pales réglables en marche. Cette turbine est, comme la turbine Francis à réaction et à injection totale. La régulation de puissance se fait par celle du débit d'eau qui arrive sur la roue et cette fonction est assurée par les directrices manœuvrées par le cercle de vannage et les pales manœuvrées par le croisillon. Le croisillon étant lui-même manœuvré par un vérin.

Ce mode de production à un coût d'investissement de départ élevé. Il est aussi tributaire des aléas climatique en ce sens qu'il dépend de la pluviométrie alors que notre pays est sahélien et la pluviométrie n'est pas abondante toutes les années. Le relief est également une donnée importante parce qu'il faut identifier des sites potentiels présentant les caractéristiques nécessaire pour l'implantation d'un barrage hydroélectrique.

En dehors de ces difficultés liées à la nature, la production hydroélectrique présente l'avantage dans le contexte actuel de la SONABEL de ne pas consommer de combustible et très peu de lubrifiant si ce n'est pour les groupes auxiliaires. Il s'agit d'une énergie propre qui ne pollue presque pas l'environnement.

### **Parc de production des principales centrales hydroélectriques de la SONABEL**

La SONABEL dispose de deux barrages hydroélectriques et de deux micros barrages qui sont : Bagré mis en service en 1993, Kompienga en 1989, Tourni et Niofila en 1996.

Tableau 1 : Caractéristiques du parc de machine des barrages hydroélectriques

	Kompienga	Bagré	Tourni	Niofila
Fournisseur	VOITH	Sulzer Escher Wyss	Sulzer Hydro	Sulzer Hydro
Type	Kaplan	Kaplan	Francis	Francis
Nombre	2	2	2	3
Débit maxi par turbine	23,28 m <sup>3</sup> /s	40 m <sup>3</sup> /s	1,15 m <sup>3</sup> /s	0,968 m <sup>3</sup> /s
Hauteur de chute nominale	33,7 m	23 m	29,2 m	71 m
Puissance	7,14 MW	8,36 MW	250 KW	500 KW
Vitesse de rotation	375 tr/mn	272,7 tr/mn	1 000 tr/mn	1 500 tr/mn
Productible centrale	33 GWh / an	44,5 GWh / an	2,48 GWh / an	7 GWh / an

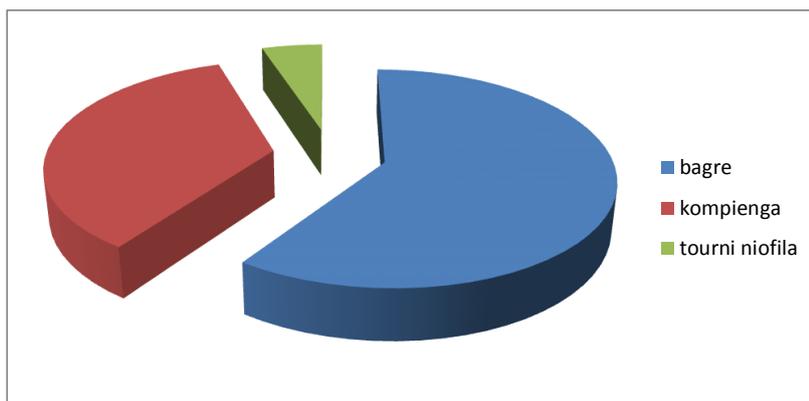
Sources : Données extraites du rapport d'activité 1998 SONABEL.

### Production des barrages hydroélectriques

Bagré, Kompienga et Tourni-Niofila.

Ces trois barrages ont respectivement comme productible 44,5 GWh pour Bagré, 33GWh pour Kompienga et 7 GWh pour Tourni et Niofila.

Figure 6 : Part de chaque barrage dans la production hydroélectrique totale



Source : par l'auteur à partir des données du tableau

### II.3. L'énergie importée

Commencées seulement depuis 2001, les importations d'électricité représentaient seulement 17% dans l'approvisionnement en électricité du pays avec un total de 144599534 kWh en 2009. Cette part a progressée en raison des nouvelles orientations des politiques d'électrification de nos pays orientés de plus en plus vers les interconnexions et l'importation d'énergie entre pays. On peut citer dans ce sens les programmes initiés par l'UEMOA et la CEDEAO pour faire face à la crise énergétique qui sévit dans les pays membres de ces institutions. Ainsi en 2012 la part de l'énergie importée dans l'approvisionnement totale du pays s'élève à 45,2%.

#### **II.4. La production des énergies renouvelables**

Bien qu'étant en projet, nous allons tout de même présenter les caractéristiques du projet d'installation de la centrale solaire de Zagtouli actuellement en phase de démarrage.

Tableau 2 : Caractéristiques générales de la centrale solaire de Zagtouli

Puissance PV installée	22,08 MWc
Puissance électrique nominale	20 MW
Production annuelle estimée (bornes onduleurs)	30.930 MW
Tension nominale de branchement au réseau	33 kV AC
Sources : rapport d'étude de faisabilité centrale solaire des Zagtouli / SONABEL	

Source : Etude de faisabilité centrale solaire de Zagtouli

Dans le domaine du biocarburant, des initiatives existent pour promouvoir sa production à partir du jatropha, plante dont l'huile extraite des graines sert à produire du carburant. A ce jour, le pays compte 70 milles hectares de plantations de jatropha. Aussi, il a été inauguré le 15 juillet 2010 par la Société Belwet Biocarburant SA une unité industrielle de production de biocarburant à partir des graines du jatropha et de bien d'autres graines. La production annuelle de l'unité est estimée à 5 000 litres de biocarburant pour 30 000 tonnes de graines attendues. La SONABEL n'est pas encore active dans ce domaine.

#### **II.5. Récapitulatifs des énergies produites et importée par la SONABEL**

Ce récapitulatif comprendra essentiellement l'énergie thermique, hydroélectrique et l'énergie importée. Les énergies renouvelables sont insignifiantes et le plus souvent en phase expérimentale ou même de projet.

Tableau 3 : L'énergie produite et importée en 2012

---

Rédigé et soutenu par Jean Baptiste KY promotion 2011-2012

Production d'énergie	Pourcentage par rapport au total
Production thermique	46,3%
Production hydroélectrique	8,5%
Énergie importée	45,2%
Énergie totale produite	54,80%
Énergie totale	100%

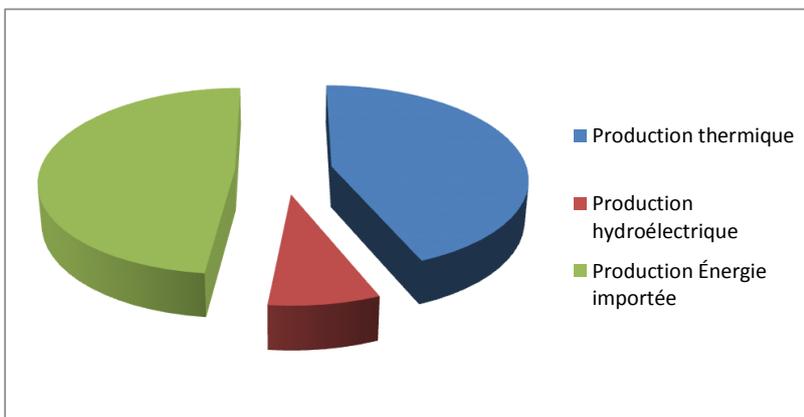
Source: Compilation à partir des rapports d'activités de la SONABEL

#### **Part de chaque type d'énergie dans l'offre totale en énergie électrique de la SONABEL.**

Dans la production nationale c'est-à-dire en termes d'énergie produite sur le sol national, la production hydroélectrique compte pour 15,45 % contre 84,55 % pour la production thermique. Ce qui démontre clairement que la production nationale est largement dominée par la technologie thermique.

Nous présentons dans le graphique ci-dessous la part de chaque type d'énergies dans la l'offre totale de la SONABEL.

Figure 7 : Part de chaque type d'énergie dans l'offre totale de la SONABEL



Source : Réalisé par l'auteur à partir des données du tableau.

Dans les faits pendant que le parc thermique a connu une augmentation du fait de la construction de nouvelles centrales comme celle de Kossodo et Komsilga, et du renforcement des centrales existantes, les centrales hydroélectriques sont restées intactes depuis leur

création. Il va s'en dire que la part de l'hydroélectricité dans la production et l'offre totale décroîtra au fil des ans avec l'effet conjugué de l'extension du réseau et du nombre d'abonné et de la politique d'importation d'énergie.

### III. ANALYSE COMPARATIVES DES SOURCES DE PRODUCTION D'ENERGIES

Dans cette partie il s'agit pour nous de monter pour les différents types d'énergies par sources les avantages et les inconvénients à leur utilisation afin de convaincre dans le choix que nous allons faire dans le cadre de notre plaidoyer.

#### III.1. Avantages et inconvénients des ressources thermiques

Tableau 4 : tableau des caractéristiques de la ressource thermique.

Type d'énergie	Utilisations les plus courantes	Avantages	Inconvénients
Pétrole	Partout et pratiquement pour tout	Forte densité, commodité de transport et d'utilisation, fiabilité	Dépendance des Pays Producteur, disparition à Moyen terme, pollution, effet de serre

A la lecture du tableau nous constatons que nous avons plus d'inconvénients que d'avantages pour cette source d'énergie. En dehors de la fiabilité de la technologie au stade actuel du développement, les autres avantages cités ne résistent pas à l'analyse. La forte densité et la commodité de transport ne constituent pas un avantage particulier pour un pays en tant qu'entité autonome. Ce sont des avantages relatifs.

L'inconvénient majeur pour notre pays est sans aucun doute le coût des combustibles et des lubrifiants. Pour illustration le tableau ci-dessous nous renseigne sur la situation réelle de la SONABEL. Le pays ne dispose pas de pétrole d'où l'obligation de l'importer de l'extérieur à des coûts exorbitants. Pour l'année 2011 la SONABEL a acheté 44 126 668 litres pour un montant de 17 776 623 989FCFA.

Cet inconvénient majeur ajouté aux différents problèmes cités plus hauts relatifs aux problèmes réels de la production thermique à la SONABEL nous amène à nous poser les

interrogations suivantes : Cette forme d'énergie est-elle la mieux indiquée pour notre pays ? Pourquoi ne nous orienterions nous pas vers des sources d'énergie moins coûteuses ; plus disponibles, moins polluantes pour lesquels le pays à un avantage comparatif en terme de ressource tel que le solaire et dans une certaine mesure la biomasse et l'hydroélectricité.

### III.2. Avantages et inconvénients de la ressource l'hydroélectrique

Tableau 5 : tableau des caractéristiques de la ressource hydroélectrique.

Type d'énergie	Utilisations les plus courantes	Avantages	Inconvénients
Hydraulique	Electricité pour tous usages	Non polluant, coût du kWh faible, exploitation facile, coût d'exploitation faible, modulation de puissance instantanée, aménagement à buts multiples (énergie, irrigation, pisciculture, loisirs)	Localisée, gros investissements, perturbation de la flore et de la faune autour de la rivière, environnement autour du lac, forte dépendance de la pluviométrie.

Il est facile de constater que les avantages de ce type de production sont plus nombreux que ses inconvénients. En se référant également à la situation existante de la SONABEL il n'y a pas de commune mesure avec la production thermique. La production hydroélectrique est plus avantageuse du point de vue disponibilité de la ressources en témoigne les sites potentiels identifiés, en terme de frais d'entretien et pièces de rechanges, en terme de consommation de combustibles et de lubrifiant, en terme de pollution, et d'une façon générale en terme de charge d'exploitation.

Les inconvénients de ce mode de production sont :

- le coût de l'investissement de départ. Ce qui est rapidement rattrapé par les différents coûts cités au niveau de la production thermique.
- La dépendance vis-à-vis des aléas climatiques liés à la pluviométrie
- Le choix du site entraînant des impacts environnementaux et sociaux tels que la perturbation de l'écosystème et les déplacements de populations.

Du point de vue technologie d'installation et de fonctionnement la SONABEL jouit d'une expérience de plus d'une quinzaine d'année dans le domaine. Cette technologie est donc suffisamment maîtrisée. De plus en raison du potentiel encore disponible dans notre pays et

ses multiples avantages, nous pensons que ce mode de production doit évoluer et prendre une part encore plus importante dans le dispositif de production de la SONABEL.

### III.3. Avantages et inconvénient de la ressource solaire

Tableau 6 : tableau des caractéristiques de la ressource solaire.

Type d'énergie	Utilisations les plus courantes	Avantages	Inconvénients
La ressource solaire	Chauffages divers, cuisson des aliments, hautes températures, alimentation électrique des sites isolés, pompage PV dans les villages.	Non polluant, disponible partout, gratuité du soleil, simplicité, renouvelable	Faible densité, irrégularité, technologie totalement maîtrisée, coût d'investissement encore élevé.

Les avantages liés à cette technologie sont indiscutables. L'avantage majeur pour notre pays est sa disponibilité en abondance. En termes d'inconvénient, les arguments qui reviennent le plus souvent sont la maturité de la technologie et le coût des matériaux pour l'investissement initial. On peut aussi citer la non disponibilité à la tombée de la nuit en cas de non stockage de l'énergie.

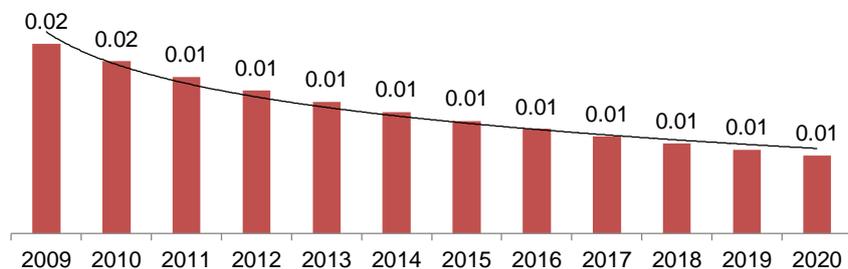
En effet les coûts des matériaux utilisables dans cette technologie sont en baisse de nos jours. Les prix du silicium monocristallin sont passés sur le marché Allemand de 2,4€ /Wc en début 2009 à 1,6€ /Wc en fin 2010. Le prix des modules photovoltaïques au silicium en couche mince ont baissé de 0,76\$/Wc depuis 2008 et descendra encore de 0,5 à 0,6\$/Wc d'ici 2015.<sup>8</sup> Cette baisse des coûts des matériaux induira nécessairement la baisse du coût de revient du kWh.

D'une façon générale le coût de l'électricité solaire est en baisse. Ce coût qui était de 0,35\$/kWh en 1995, a chuté à 0,25\$/kWh en 2005.

Le prix du Watt-crête (Wc) baisse constamment d'année en année comme l'indique la figure ci-dessous.

<sup>8</sup> Rapport d'étude de faisabilité de la centrale photovoltaïque de Zagtoui.

Figure 8 : Evolution du prix des modules en €/Wc



Source : Rapport d'étude de faisabilité de Zagtouli

La technologie solaire est de nos jours très avancée surtout pour le solaire photovoltaïque et les recherches sont toujours en cours pour la maîtrise totale des autres formes d'utilisation de l'énergie solaires.

Un argument très important militant en faveur du solaire concerne la prochaine centrale solaire de Zagtouli. En effet le calcul des émissions du parc thermique de la SONABEL fait sur la base des derniers groupes installés sur son site de production thermique de Kossodo. Il révèle que la centrale de Zagtouli permettra d'éviter l'émission de près de 18.000 tonnes de CO<sub>2</sub> par an<sup>9</sup>.

### III.4. Synthèse et choix

Cette analyse comparative associée à la réalité de terrain au niveau de la SONABEL développé dans la partie précédente nous permet de dégager clairement les avantages et inconvénients de chaque type de production. La comparaison entre le thermique et l'hydroélectrique nous permet aisément de dégager notre préférence pour l'hydroélectricité en raison de multiples inconvénients de la production thermique et des avantages de la production hydroélectrique. Quant à la troisième source notamment la production solaire photovoltaïque elle entre dans nos choix en raison des avantages majeurs cités.

Les développements opérés dans cette partie et la précédente nous orienteront dans nos propositions et recommandations dans la dernière partie de ce document.

<sup>9</sup>Rapport d'étude de faisabilité de la centrale photovoltaïque de Zagtouli

## IV. FOCUS SUR LE MODE DE PRODUCTION SOLAIRE

### Projet d'étude d'installation d'une centrale solaire photovoltaïque de 10MW à Kaya et raccordement au réseau

Après analyse des avantages et inconvénients des différentes sources et notre choix en faveur des énergies renouvelables notamment le solaire, l'hydroélectricité et la biomasse, il convient d'approfondir notre analyse de ces différents types d'énergies.

La technologie hydroélectrique est déjà largement utilisée par la SONABEL et prouvé sa fiabilité. Il s'agit pour la SONABEL de profiter du potentiel existant pour augmenter la part de ce type d'énergie dans sa production.

La biomasse pour les raisons déjà cité ne permet pas de produire une énergie à grande échelle et utilisé pour des besoins localisée et domestiques.

La production d'énergie solaire ayant été retenue comme un choix majeur dans notre analyse comparative, il convient d'approfondir en nous basant sur une étude de cas. Il s'agit d'une étude d'implantation d'une centrale solaire photovoltaïque à Kaya. Il s'agit d'une étude technique de dimensionnement de la centrale et d'analyse du comportement dynamique du réseau RNI à l'injection de la production solaire. Nous n'aborderons pas dans ce document l'étude économique financière qui s'avérerait fastidieuse et pourrait faire l'objet d'un autre rapport.

Dans cette étude nous aborderons les points suivants :

- ✚ Justification du choix d'implantation.
- ✚ Aperçu sur les types de centrales existantes.
- ✚ La technologie d'installation d'une centrale solaire.
- ✚ L'injection de la tension dans le réseau de la SONABEL et problème de stabilité.

#### IV.1 Justification du choix d'implantation

Dans notre souci de privilégier les énergies renouvelables, nous avons évoqué l'abondant potentiel en matière de ressource solaire. En effet le Burkina Faso d'une façon générale et le nord en particulier a un avantage comparatif en termes d'insolation. Le rayonnement solaire moyen du pays est compris entre 5,5 et 6kWh/m<sup>2</sup>/jour. Cette localité offre donc des conditions favorables pour l'implantation d'une centrale solaire photovoltaïque.

La ville de Kaya est alimentée actuellement par le réseau national interconnecté. Dans l'optique de la réalisation du Schéma directeur d'électrification du Burkina Faso, il est prévu de relier la ville de Dori et d'autres localité intermédiaires au réseau national interconnecté en partant de Kaya à l'horizon 2014, avec une tension de 33kV.

Nous proposons la construction d'une centrale solaire photovoltaïque qui injectera sa production dans la ligne d'interconnexion. Cette centrale d'une puissance de 10 MW pourra renforcer les capacités de production globale de la SONABEL et permettre :

- De supprimer la centrale électrique thermique de Dori
- D'alimenter les localités de Pissila, Yargo, Bani, Tougouri
- D'offrir une possibilité aux mines de la localité de se raccorder sur la ligne 33kV.

L'installation de cette centrale à Kaya est guidée par le souci de pour renforcer l'offre énergétique en profitant de l'avantage qu'offre notre pays pour cette source et particulièrement cette localité en termes de rayonnement solaire, la situation géographique par rapport aux localités à desservir, la possibilité de profiter des installations déjà présente pour le raccordement et l'injection de la tension et l'espace disponible sans pression foncière particulière. Dans le cadre de notre étude, nous considérerons la situation post interconnexion ce qui nous permettra de mener l'étude d'installation de la centrale solaire photovoltaïque avec injection dans le réseau national interconnecté.

Pour cette injection du solaire il sera nécessaire d'étudier les caractéristiques des installations existantes, en vue de proposer les équipements complémentaires pour prendre en compte cette énergie à injecter.

### **Evaluation de la charge à alimenter**

La localité de Dori est actuellement alimentée par une centrale thermique qui a été mise en service en 1983 et a fait l'objet de modifications en 2002 et 2006. Elle est exploitée en service

continu et emploie 5 personnes dont 1 chef de production et 4 agents de conduite. La centrale a une puissance installée totale de 1,9 MVA. Elle est équipée de 3 groupes électrogènes à moteur Diesel. La centrale débite actuellement sur un réseau MT qui est exploité en 5,5 kV et est organisé autour de deux départs d'une longueur totale de 6,7 km qui alimentent uniquement l'agglomération de Dori.<sup>10</sup> Ce réseau est constitué de lignes aériennes supportées par des poteaux métalliques. La SONABEL prévoit d'effectuer le passage de la tension dans la localité de Dori de 5,5 à 33 kV dans le cadre du raccordement du réseau de distribution de la localité au réseau national interconnecté.

Pour les localités à alimenter entre Kaya et Dori, nous avons des estimations issues de l'étude de faisabilité de la ligne d'interconnexion donnant les puissances à installer. Pour Pissila, il est prévu 3 postes H61 de 50 kVA ; Tougouri, 3 postes de H61 de 50 kVA ; Bani, 1 poste H61 de 50 kVA ; Yalgo, 3 Postes H61 de 50 kVA. Cela nous donne au total une puissance de 500kVA à installer pour les dix postes alimentant les quatre localités le long de la route nationale numéro 3. Si nous ajoutons cela à la puissance installée de Dori, nous nous retrouvons avec une puissance totale de 2,4 MVA. Cette charge est entièrement prise en charge par notre centrale solaire ce qui nous permet de penser qu'on peut raccorder les mines voisines en se basant sur cet apport d'énergie. La localité de Dori est reliée à d'autres localités telles que Gorom Gorom, Sebba, Falagountou qui pourront profiter de cette énergie. Le point d'injection sur le réseau étant Kaya, il sera également possible d'alimenter la ville de Ziniaré et les localités intermédiaires.

La réalisation de cette centrale sera faite concomitamment ou après la réalisation de l'interconnexion pour nous permettre de gagner en investissement. Il s'agira de profiter :

- des locaux du poste pour l'installation des équipements sensibles de notre centrale et les cellules à installer ;
- Du poste de Kaya pour l'injection de la production de la centrale solaire dans le réseau national interconnecté.
- De profiter du personnel de la localité pour la surveillance, l'exploitation et l'entretien de la centrale.
- De profiter des lignes construites ou à construire pour l'évacuation de l'énergie produite.

---

<sup>10</sup> Rapport d'activité SONABEL

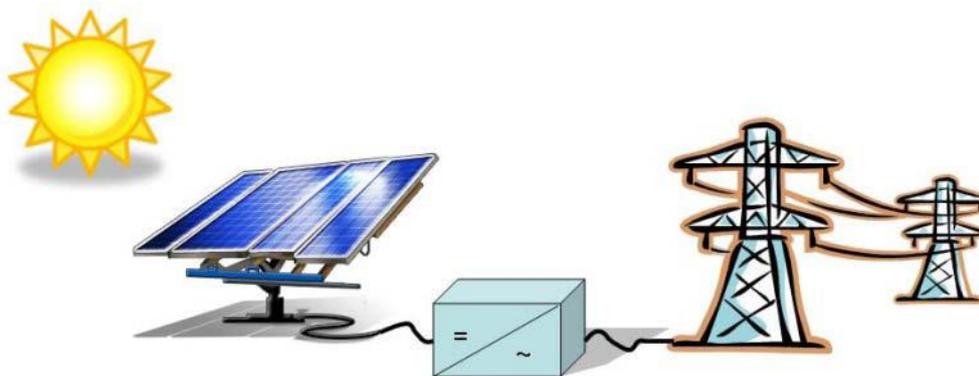
- D'assurer la stabilité du réseau et de la desserte par une gestion harmonieuse des deux sources notamment l'interconnexion et la centrale solaire. Le RNI pourra suppléer au faiblesse de la centrale solaire en terme de stabilité et cette dernière apportant une économie en terme de coût d'entretien, carburant, lubrifiant, frais de personnel, impact environnemental...

## IV.2 Aperçu sur les types de centrales solaires photovoltaïques

Il existe différents type de centrales selon l'utilisation et le mode d'alimentation que l'on adopte.

### Centrale photovoltaïque sans stockage injecté dans le réseau

Nous avons des centrales photovoltaïques dont la production est injectée dans un réseau existant et les autres moyens de production existant de ce réseau servant de relais pour la continuité ou la stabilisation de l'alimentation en cas de perturbation. Dans le cas du réseau SONABEL cette production sera injecté dans le réseau national interconnecté, ce qui nécessite une étude de stabilité pour pallier aux situations d'indisponibilité de la production solaire. Cet aspect est d'autant plus important que, comme nous l'avons souligné plus haut dans les avantages et inconvénients de la source solaires, nous pouvons avoir des obstacles à l'insolation optimale des sites en raison des intempéries ou d'un masque quelconque.



### Les centrales hybrides

- Des centrales photovoltaïque isolée ou connectés à un réseau, sans stockages avec groupe secours. Ce système consiste en la production photovoltaïque, sans stockage, avec des automates qui gèrent les groupes et le photovoltaïque en fonction de la charge. Le générateur photovoltaïque étant couplé à une autre source d'énergie électrique, on parle alors de générateur ou centrale hybride. L'avantage d'une centrale hybride est de minimiser les coûts d'investissement, qui sont beaucoup plus importants pour une production 100% renouvelable que pour un générateur DDO par exemple, avec des coûts de fonctionnement comparé à un générateur DDO beaucoup plus faibles.

#### **Centrales photovoltaïque avec stockage**

- Des centrales Photovoltaïque avec stockage qui consiste en un stockage de l'énergie à l'aide de batteries qui permet l'alimentation sans interruption des équipements. L'inconvénient de ce type de centrale est le coût très élevé du système de stockage avec les batteries qui engendre un investissement très élevé au départ du projet.

Pour le cas ayant fait l'objet de notre choix, il s'agit d'une centrale interconnecté au réseau, c'est-à-dire produisant et injectant dans le réseau interconnecté existant. Nous allons approfondir notre étude sur ce type de centrale mais nous évoquerons également les deux autres types étant donné nos propositions faites pour l'alimentation des centres isolés et certains équipements publics ou privés isolés du réseau par des systèmes photovoltaïques

### **IV.3 La technologie d'installation de la centrale solaire et élément de coût d'installation.**

#### **Les étapes de réalisation**

Nous énumérons ici tous les éléments et étapes entrant dans la réalisation d'une centrale solaire Photovoltaïque. Pour les différents types de centrale, les éléments suivant sont à prendre en compte dans la réalisation et le calcul des coûts :

- *Fourniture et pose du générateur photovoltaïque, comprenant :*
  - La mise en sécurité du chantier,
  - Les aménagements du terrain : terrassement, accès, grillage, fermeture,
  - La fourniture et la pose des structures,
  - La fourniture et la pose des modules photovoltaïques,

- Les aménagements pour le local électrique contenant le ou les onduleurs et les coffrets de protection,
- La fourniture et la pose des onduleurs,
- *L'ensemble du matériel électrique nécessaire à l'installation, à savoir :*
- Câbles et chemins de câbles,
- Coffrets électriques et organes de protection DC et AC,
- Système d'acquisition de données et sondes associés à un système de supervision des données (logiciel), permettant un suivi des performances du système et des pannes ou défauts éventuels. Les informations peuvent être traitées à distance via une connexion internet ou cellulaire,
- La fourniture et l'installation d'un transformateur si le raccordement est en moyenne tension,
- le percement et la réalisation de tranchées pour le passage des câbles,
- La fourniture et l'installation des automates dans le cas d'un système type hybride ou avec stockage, ce qui n'est pas utile dans notre cas présent.
- la fourniture et l'installation des batteries et protections associées, ainsi que la fourniture et l'installation des onduleurs/chargeurs dans le cas d'une installation avec stockage non prévu dans notre cas
- L'ingénierie et le suivi des travaux,
- Le transport des modules jusqu'à Ouagadougou, puis le transport local et le stockage,
- Les essais et la mise en service.

En considérant l'hypothèse que le raccordement sera effectué par le personnel de la SONABEL, nous ne prévoyons pas de frais de main d'œuvre à ce niveau. Il reste alors à évaluer les investissements en termes de matériel et d'équipements. Les coûts des fournitures et sont estimés selon le marché ou l'on s'approvisionne.

Caractéristiques de notre centrale solaire photovoltaïque

Puissance crête	10002 kWc
Puissance électrique nominale	9 MW
Production annuelle estimée (bornes onduleurs)	17 785mWh
Tension nominale de branchement au réseau	33 kV AC

Type de panneaux photovoltaïques	Silicium cristallin
Puissance nominale unitaire	245Wc
Nombre de panneaux PV	40.824
Surface totale de panneaux PV	67360 m <sup>2</sup>
Inclinaison sur l'horizontale 15°	

### **Organisation**

Nombre total de champs PV	20
Nombre total d'onduleurs	18
Puissance nominale unitaire par onduleur	500 kW
Tension nominale CA BT	270 V

### **Mode opératoire**

#### ➤ **Les panneaux photovoltaïques et leur installation**

Les « cellules » sont les composants de base d'un module photovoltaïque. Elles sont constituées de matériaux semi-conducteurs, qui convertissent l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique. Plusieurs matériaux sont utilisés à ce jour, mais parmi ceux-ci le silicium est le plus répandue et relativement peu couteux d'où sont utilisation dans nos projets. Dans notre cas nous choisissons le silicium cristallin en raison de son rendement 15%. L'installation de ces panneaux se fait selon les données du dimensionnement issues du logiciel.

Notre centrale est prévue pour être implantée au sol. Le logiciel PVGIS nous permet de déterminer les caractéristiques optimums liées au gisement solaire notamment le niveau d'ensoleillement, l'inclinaison, l'orientation des installations. L'inclinaison des tables et l'espacement optimal entre modules, doit être déterminé de sorte à obtenir la meilleure production. La solution retenue sera une installation avec des rangées de table de modules ayant une inclinaison suffisante pour l'écoulement des eaux et permettant la circulation de personnes pour l'entretien, ainsi qu'une hauteur suffisante pour intervenir sous les modules pour leur installation et la maintenance. Nous utiliserons un autre logiciel plus adapté pour le dimensionnement photovoltaïque solaire qui nous donne des caractéristiques plus précises en terme de nombre de panneaux, d'onduleur, la puissance, les pertes ...

## **PVGIS estimation de la production d'électricité solaire**

Base de données de radiation solaire employée: PVGIS-helioclim

Puissance nominale du système PV: 10000.0 kW (silicium cristallin)

Pertes estimées à cause de la température et des niveaux faibles de rayonnement: 15.0%  
(employons température ambiante locale)

D'autres pertes (câble, onduleur, etc.): 14.0%

Pertes conjuguées du système PV: 28.8%

Système fixe : Inclinaison 15°, orientation 0° sud

Nous avons en annexe le rapport complet des simulations avec les logiciels.

En fonction des estimations obtenues des deux logiciels, PVSYST et PVGIS on peut dimensionner les éléments de fixation des différents équipements de sorte à obtenir un fonctionnement optimal de l'installation.

Après avoir obtenu les données géographiques optimales, nous procédons au dimensionnement de notre centrale à l'aide du logiciel PVSYST. Il s'agit d'un logiciel de dimensionnement solaire photovoltaïque qui nous permet en choisissant nos équipements et notre puissance désirée d'obtenir les caractéristiques optimums pour la réalisation de la centrale solaire photovoltaïque. Avant d'effectuer la simulation proprement dites il convient d'étudier les caractéristiques des équipements à utiliser et les choisir en fonction de notre réseau et de notre contexte.

### **➤ Les onduleurs et leur choix**

Les onduleurs sont des appareillages d'électronique de puissance permettant de convertir le courant continu délivré par les modules photovoltaïques en courant alternatif injecté sur le réseau public de distribution d'électricité.

Pour ces onduleurs, l'accent devra être mis sur la bonne adéquation entre leur puissance nominale et la puissance du champ photovoltaïque, afin de garantir une plage de tension et courant de l'onduleur adaptée aux tensions et courants délivrés par les modules photovoltaïques.

Les puissances délivrées par le champ photovoltaïque variant suivant l'ensoleillement. l'onduleur devra être à même de fonctionner avec un rendement élevé sur la gamme de puissance à laquelle le champ photovoltaïque fonctionne. Les bonnes règles du

dimensionnement préconisent un ratio « puissance onduleur » sur « puissance crête » compris entre 0,8 et 1.

Selon le type de puissance envisagé et la configuration électrique souhaitée, une large gamme d'onduleurs est disponibles sur le marché, pour des puissances d'injection variant de quelque centaines de VA à plusieurs centaines de kVa. En général, il est nécessaire de choisir entre une configuration :

- décentralisée c'est-à-dire utilisation de nombreux onduleurs de faible puissance ;
- centralisée, utilisation d'un ou plusieurs onduleurs de puissance importante.

Pour les centrales couplés au réseau interconnecté comme le nôtre, une fonction de « découplage réseau » devra être assurée par un dispositif incorporé à l'onduleur (ou externe à l'onduleur si la fonction interne n'est pas conforme ou inexistante). Les objectifs de la fonction de découplage sont :

- d'éviter d'alimenter un défaut ou de laisser sous tension un ouvrage en défaut ;
- d'éviter d'alimenter les autres installations raccordées au réseau à une tension ou une fréquence anormale ;
- de permettre le ré-enclenchement automatique des ouvrages du réseau.

Au regard de l'instabilité du aux variations de tension et fréquence de notre réseau, nous utiliserons des onduleurs ayant les caractéristiques suivantes :

1. Facilement paramétrables, afin d'éviter des coupures intempestives,
2. Permettant de réaliser des campagnes de mesures des paramètres réseau aux points d'injection prévus afin de s'adapter aux fluctuations.
3. Permettant le ré-enclenchement automatique des ouvrages du réseau.

Nous avons dans le logiciel des menus permettant de choisir le fabricant, la puissance et autres caractéristiques des équipements choisis. Il s'agit pour le concepteur de choisir au mieux selon le type d'installation voulu les caractéristiques optimales pour obtenir le meilleur rendement possible. Ceci est valable aussi bien pour les panneaux solaires photovoltaïque que pour les onduleurs. Ces choix détermine la puissance nominale et par la suite le dimensionnement des câbles à utiliser pour les raccordements.



## Configuration générale de la centrale solaire et simulations



Nous avons utilisé le logiciel PVSYS pour le dimensionnement de notre centrale. Nous donnerons ici les caractéristiques principales issues de la simulation, le résultat complet sera présenté en annexe du document.

### Résultats succinct des simulations

Le rapport complet des simulations est joint en annexe du document

#### **Système couplé au réseau: Projet : Centrale solaire de Kaya**

##### **Site géographique Kaya Pays BURKINA FASO**

**Situation** Latitude 13.1°N Longitude 1.1°W

Temps défini comme Temps légal Fuseau horaire TU+0 Altitude 330 m

**Données météo :** Kaya de NASA-SSE, Données horaires synthétiques

Date de la simulation 08/06/13 à 16h08

##### **Paramètres de simulation**

**Orientation plan capteurs** Inclinaison 15° Azimut 0°

**20Sheds** Espacement 6.60 m Largeur collecteurs 3.00 m

**Ombrages proches** Ombrage mutuel des sheds

##### **Caractéristiques du champ de capteurs**

**Module PV** Si-poly Modèle **REC 245PE**, Fabricant REC

**Nombre de modules PV :** En série 24 modules En parallèle 1701 chaînes

**Nombre total de modules PV :** 40824 de Puissance unitaire 245 Wc

**Puissance globale du champ Nominale (STC) : 10002 kWc**

**Surface totale** : Surface modules **67360 m<sup>2</sup>**, Surface cellule 59610 m<sup>2</sup>

**Onduleur** : Modèle **Powador XP500-HV TL**, Fabricant : KACO new energy

Caractéristiques Tension de fonctionnement 550-830 V Puissance unitaire 500 kW AC

**Batterie d'onduleurs** : Nombre d'onduleurs 18 unités

**Puissance totale** : 9000 kW AC

Source : Logiciel PVSYS

Une autre simulation avec le logiciel Sunny design, dont le résultat complet sera également présenté en annexe nous donne les données caractéristiques suivantes :

Résultats de simulation Logiciel Sunny design

**Centrale solaire PV de Kaya001 dont Site: Burkina Faso / Ouagadougou**

Tension du réseau: 3~33 kV

**Type de panneaux : 43472 x REC REC230PE (BLK) (Générateur PV 1)**

Orientation : Azimut: 0°, Inclinaison: 15°,

Type de montage: Installation libre,

Puissance de crête: 10,00mWp

**Type d'onduleur : 16 x SC 500HE-20**

Nombre total de panneaux photovoltaïques:43472

Puissance de crête: 10,00 MWc

Nombre d'onduleurs: 16

Puissance AC nominale: 8,00 mW

Puissance active AC: 8,00 mW

Rapport de puissance active: 80 %

Rendement énergétique annuel (environ)\*:19125,89 mWh

Facteur d'utilisation de l'énergie: 99,7 %

Indice de performance (env.)\*: 84,8 %

Rendement énergétique spécifique (environ)\*:1913 kWh/kWh

Source : Logiciel Sunny design

En comparant les deux simulations nous nous rendons à l'évidence qu'il est important de bien choisir les éléments du dimensionnement. Les plus significatifs à notre avis sont : Le type de panneaux solaire selon ses performances, le type d'onduleurs et ses performances, de l'orientation des panneaux et la situation géographique de l'installation.

La première simulation nous donne une puissance nominale plus importante à la sortie des onduleurs en alternatif donc un meilleur rendement. Elle fera donc objet de notre choix.

### **Élévation de la tension et raccordement de la centrale solaire au RNI**

La centrale solaire est équipée de modules de production solaire de 500 kW chacun. Chaque bloc est équipé d'un onduleur, d'un transformateur BT/33 kV débitant sur un poste 33 kV en coupure d'artère comportant des appareils de coupures notamment des interrupteurs et interrupteurs fusibles pour la protection des équipements. Du jeu de barre, partons deux départs 33KV pour l'alimentation moyenne tension des localités à desservir.

Les transformateurs élévateurs à installer seront à isolement sec ou liquide exempt de PCB. Ils permettront l'élévation de la tension de sortie des onduleurs (CA BT) à la tension appropriée pour le raccordement de l'installation au réseau électrique HT, c'est à dire 33 kV dans notre cas. Le branchement entre l'onduleur et le transformateur se réalisera au moyen d'un circuit triphasé en triangle ayant une tension de 270V.

Un interrupteur magnéthermique triphasé de 1250A sera installé comme protection avant de connecter les conducteurs au transformateur. Cette précision est nécessaire en raison de l'intensité maxi en courant continue de l'onduleur que correspond à cette valeur limite.

L'interrupteur sera installé à l'intérieur d'un local, dans un espace existant habilité, pour les protections de courant alternatif entre l'onduleur et le transformateur.

Compte tenu des éléments précédents chaque départ doit être capable de transporter environ 10 MW soit 175 A. En outre les câbles doivent pouvoir supporter le courant de court-circuit. En fonction du courant admissible nous pouvons utiliser une section de câble unipolaire de 70 mm<sup>2</sup>. Nous prendrons cependant un câble de 95mm<sup>2</sup> en tenant compte des conditions climatiques de la zone et des évolutions futures.

### **Dispositif de protection**

Les départs 33 kV de la centrale solaire seront munis de protections numériques à maximum d'intensité sans réenclencheur. Le poste centrale solaire sera muni d'un calculateur incorporant la gestion des protections, la consignation d'état et d'autres automatismes spécifiques. Nous prévoyons :

- Un déclenchement automatique et séquentiel des deux départs. L'écart de temps entre les déclenchements sera programmable.
- Enclenchement automatique et séquentiel selon un ordre programmable. L'écart de temps entre les enclenchements sera également programmable.

## **IV. 4 Injection de la production solaire sur le réseau et étude de stabilité**

Au-delà de l'installation des panneaux photovoltaïque et autre équipements entrant dans l'installation de la centrale nous allons nous pencher particulièrement sur le raccordement au réseau et les problèmes d'exploitation et de stabilité que cette injection peut entraîner.

### **IV.4.1 Point d'injection de la production sur le RNI**

L'énergie produite par la centrale solaire ne peut pas être utilisée directement sur les équipements. Il est donc nécessaire de la transformer pour l'adapter à la tension utilisée sur le réseau SONABEL conformément aux paramètres admis par la norme et le mode de production en vigueur. La tension produite comme expliqué plus haut, sera élevée à travers un transformateur élévateur et transitera par un poste avant de la rendre disponible et utilisable pour les lignes d'alimentation 33KV.

Dans le contexte actuel le centre régional de consommation de Ouagadougou (CRCO) est alimenté par le réseau national interconnecté (RNI) qui comporte des niveaux de tension allant de 220 V en Basse tension à 225 KV en haute tension. Notre centrale solaire, prévu pour apporter un plus à l'offre énergétique d'une façon générale et en particulier augmenter la part des énergies renouvelables dans cette offre a pour vocation d'injecter la production dans ce RNI. Pour injecter cette tension dans le réseau existant il convient de tenir compte d'un certain nombre de paramètres et vérifier le comportement général du réseau, la capacité de transit et le plan de tension. Ceci nécessite une simulation en vue de définir les caractéristiques à prendre en compte, à modifier ou corriger. Dans notre étude nous avons effectué cette simulation avec le logiciel NEPLAN. Cette simulation donne le résultat ci-dessous. Il s'agit de la modélisation du réseau depuis le poste source de Kossodo à Ouagadougou jusqu'à la localité de Dori et les réseaux rattachés. Sur ce réseau nous injectons la production de notre centrale solaire à Kaya comme représenté sur le synoptique et nous ajustons les paramètres en vue d'observer son impact sur le comportement de l'ensemble du réseau.

#### **❖ Disposition complémentaires au poste de Kaya**

L'étude des écoulements de charge dans les réseaux d'interconnexion a démontré la nécessité d'installer un autotransformateur au poste de Kaya pour maintenir le plan de tension sur la ligne Kaya -Dori. Dans la configuration sans l'autotransformateur l'injection de la production solaire à Kaya donne de bons résultats comme le montre la simulation. Cependant dans une

perspective d'évolution de la charge dans cette région nord, l'augmentation de la charge conduira à une chute de tension telle qu'il faudra effectivement prendre des mesures pour préserver le plan de tension convenable. L'installation de l'autotransformateur tel que proposé dans le projet d'interconnexion constitue un plus pour notre projet.

Pour prendre en compte l'injection de la tension au poste de Kaya il est indispensable d'ajouter un certain nombre d'équipements. L'extension du poste dans le cadre de l'interconnexion comporte l'installation des équipements suivants :

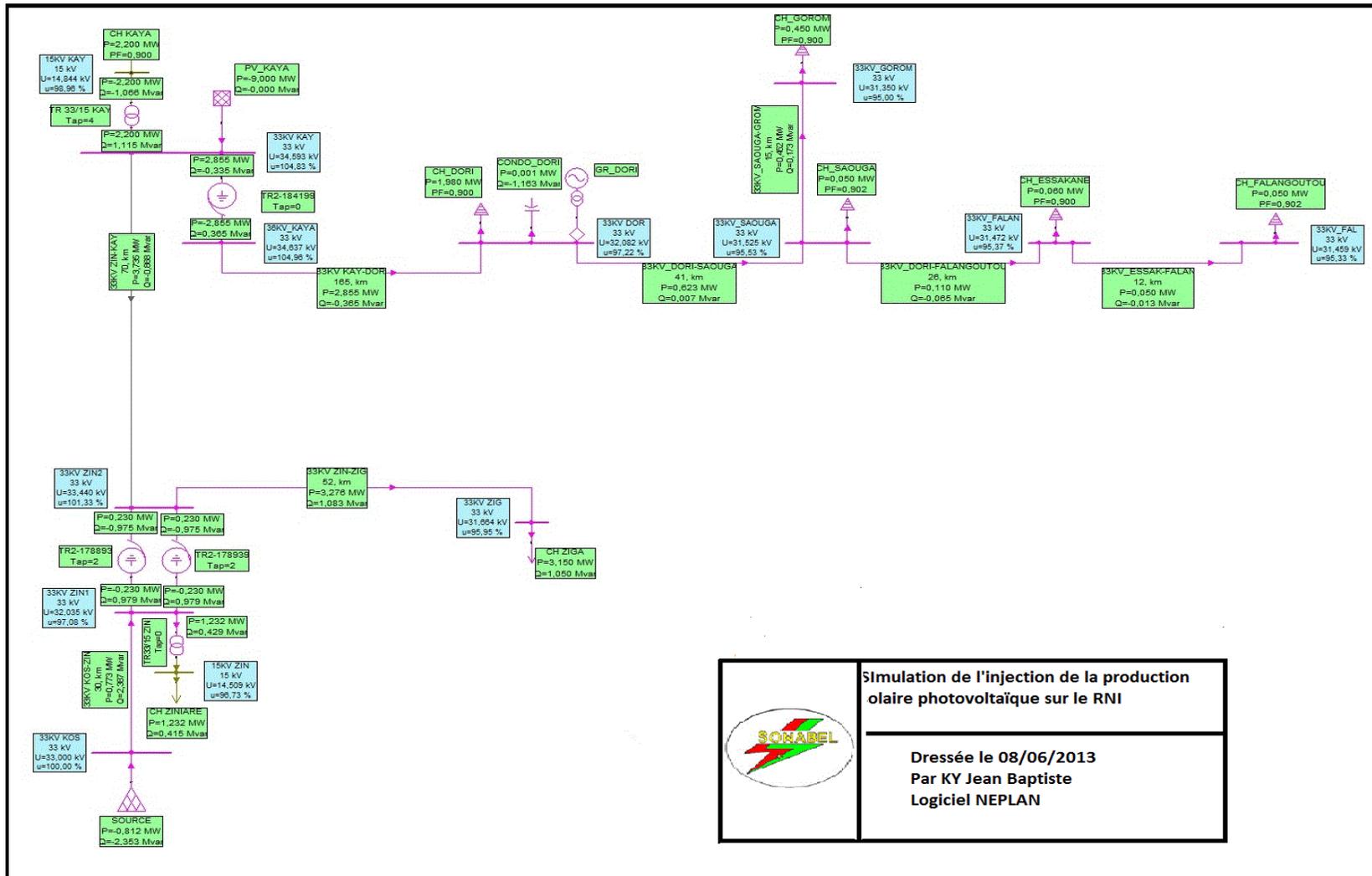
- Un autotransformateur 33/36 kV de 5 MVA, type H59 hermétique, fonctionnant à la fréquence de 50 Hz, couplage étoile, enroulement en cuivre, diélectrique huile, refroidissement ONAN, huile minérale sans PCB
- Une cellule 36 kV d'arrivée de l'autotransformateur
- Une cellule 36 kV départ ligne 33 kV vers Dori
- La pose des câbles 33 kV de raccordement entre le poste et les remontées aéro-souterraines du poteau d'extrémité de la ligne aérienne Kaya – Dori.
- La pose des câbles 33 kV de raccordement entre le poste 33 kV de Kaya et l'autotransformateur<sup>11</sup>.

Nous préconisons l'ajout de deux cellules 36kV de même marque que les cellules prévues pour l'interconnexion pour des raisons de compatibilité des équipements et de continuité des jeux de barres pour le raccordement des câbles issues de la centrale solaire. L'autotransformateur sera placé dans un enclos couvert par un toit. La construction d'une salle MT disposant d'espace adéquat est indispensable dans le cadre du projet d'interconnexion et l'installation des cellules MT de raccordement de la centrale solaire de 10 MW.

***Synoptique de l'injection de la production solaire photovoltaïque de la centrale de Kaya  
dans le réseau national interconnecté***

---

<sup>11</sup> Etude SONABEL de l'interconnexion Kaya-Dori



#### IV.4.2 Stabilité du réseau et problème d'exploitation

Nous avons observé un bon comportement des paramètres du réseau dans le cadre du raccordement au réseau de la centrale solaire. Toutefois il est nécessaire de prévoir l'installation de condensateur pour compenser une énergie réactive de 1,163 MVAR au poste de Dori en vue d'assurer la stabilité du réseau. L'installation des condensateurs ne coûte presque rien à côté de l'investissement permanent en terme de coût d'entretien, de carburants, lubrifiants, frais de personnel qu'engendre la centrale thermique de Dori si elle reste en fonctionnement.

Il convient aussi d'analyser les problèmes engendrés sur le réseau par suite d'une perte de production totale ou partielle engendrée par le réseau. Dans le cas du réseau interconnecté actuel sans le PV, nous constatons que la rupture brusque d'alimentation de la ligne d'interconnexion Côte d'Ivoire Burkina engendre un déclenchement général. Cela est dû à la variation de fréquence entraînant les protections au seuil de déclenchement.

Nous inspirant de l'étude de faisabilité de la centrale solaire de Zagtouli, la perte de la centrale PV a un impact plus significatif lorsqu'il y a moins de groupes de production thermique connectés car la part d'inertie tournante est plus faible. La variation de la fréquence réseau qui descend de façon transitoire de 5% soit en deçà de la limite de 48.8 Hz lance des séquences de délestage (97.6%). En cas de déclenchement, la perte de la centrale PV 10MW ne pose pas de problème grave de stabilité dynamique sur le RNI. La reprise de la charge d'effectue par la réserve tournante des générateurs thermiques connectés. La récupération de la tension s'effectue correctement et ne présente pas de contraintes particulières pour le RNI. La tension 33kV de Kaya peut être rétablie autour de la tension nominale par les régulateurs en charge du transformateur.

Une variation d'ensoleillement aura une conséquence moins sévère car la perte de puissance va se faire de façon progressive ce qui va laisser le temps aux régulations des groupes thermiques de réagir dans le cas d'une production hybrides.

D'une façon générale la puissance de notre centrale est telle que la puissance transitée par la ligne d'interconnexion peu supporter les fluctuations, les pertes d'ensoleillement et le déclenchement de la centrale solaire photovoltaïque sans risque majeur de déclenchement dû à une perturbation majeure de l'ensemble du RNI.

Le projet de centrale photovoltaïque de 10 MW de Kaya ne met pas en cause la stabilité du réseau et permet un remplacement effectif de la production thermique tel que prévu pour Dori. Toutefois il faudra maîtriser les variations brutales de production PV en cas d'indisponibilité de la ligne d'interconnexion avec la Côte d'Ivoire qui fournit un peu plus de 50 MW en moyenne au Réseau national interconnecté.

La production solaire photovoltaïque sans stockage ne peut éviter un caractère aléatoire lié à l'ensoleillement qui connaît des variations à toutes les échelles de temps. Les prévisions météorologiques permettent de prévoir dans une certaine mesure la production au niveau hebdomadaire et journalier et de prévoir un plan de production adapté. A l'échelle horaire et inférieure la réponse adaptée repose sur le maintien d'une réserve tournante du même ordre de grandeur que la production solaire instantanée. Celle-ci peut être fournie par les groupes Diesel des centrales existantes sur le RNI et surtout l'interconnexion avec la Côte d'Ivoire. En cas d'absence d'interconnexion, il est nécessaire d'avoir une réserve de puissance thermique mobilisable d'une puissance similaire à notre production photovoltaïque.

## V. PERSPECTIVES DE LA SONABEL

Notre objectif à travers cette partie est de présenter les perspectives de la SONABEL dans les différents modes de production. Ceci nous permettra d'éviter des redites dans nos propositions et au besoin de mieux les agencer si toutefois elles se recoupaient.

### V.1. Le Thermique

Les projets actuels au niveau de la production prévoient d'ici 2014 l'ajout de 76MW et six groupes supplémentaires réparties comme suit :

- L'ajout du groupe G1 de 16 MW à la centrale de Komsilga.
- L'ajout des G5, G6, G7 d'une puissance totale de 36 MW à la centrale de Komsilga.
- L'ajout de 2 groupes 6 et 7 d'une puissance totale de 20 MW à la centrale Bobo II.

Au regard de ces projets nous pouvons dire que la production thermique est toujours d'actualité et à encore de l'avenir à la SONABEL.

### V.2. L'hydroélectricité

Parmi les sites identifiés à nos jours seul celui de Bagré Aval est en phase d'étude de faisabilité. SONABEL en est le maître d'ouvrage délégué. Le coût de l'ouvrage est estimé à 32 600 millions de FCFA pour une production estimée de 37,3GWh/an.

Le site de Bagré aval est situé dans la province du Boulgou dont le chef-lieu est Tenkodogo, à proximité de la frontière avec le Ghana. Il se trouve sur le Nakambé, 40 km environ en aval de l'aménagement hydroélectrique de Bagré. Le site retenu permet de récupérer une partie de la chute naturelle et de créer une retenue de compensation à l'aval de Bagré donnant ainsi la possibilité de déconcentrer les débits turbinés à Bagré sur les périodes de pointe.<sup>12</sup>

### V.3. Le solaire

Le projet de centrale solaire photovoltaïque de Zagtouli a été identifié en Août 2010, comme pièce maîtresse d'un programme de promotion du solaire par le Ministère des Mines, des Carrières et de l'Energie du Burkina Faso, avec l'appui de l'Union Européenne. Pour ce projet, la SONABEL a obtenu de l'Agence Française de Développement (AFD) un premier financement de 4,5 millions d'euros.

La centrale a été définie avec les caractéristiques suivantes

<sup>12</sup> Etude d'inventaire des sites hydroélectriques du Burkina Faso.

- Puissance de 22 MW crête correspondant à 20 MW électriques
- Localisation à l'intérieur du terrain adjacent au poste de Zagtouli, appartenant à la SONABEL
- SONABEL maître d'ouvrage de l'investissement et opérateur direct de l'exploitation

Il est également prévu la mise en œuvre de projets de production d'énergie électrique à travers un partenariat public-privé, surtout dans le secteur de l'énergie solaire où la technologie coûte chère. A ce sujet le Gouvernement s'est déjà engagé dans ce sens avec la société minière SEMAFO (Société d'Exploitation Minière de l'Afrique de l'Ouest) pour l'implantation d'une centrale solaire d'une puissance de 20 MW. L'électricité produite appartiendra à la société nationale d'électricité SONABEL, et SEMAFO lui rachètera 16 MW. La mine d'or de Mana exploitée par SEMAFO se trouvera ainsi reliée au réseau électrique national, mais conservera en réserve son système d'alimentation au diesel. La SONABEL à également en projet la construction de micro centrales solaires dans certains huit(8) centres isolés ou à raccorder au réseau, notamment à Gaoua, Diapaga, Kaya, Ouaga 2000, Dédougou, Sapouy, Solenzo, Batié.

La production électrique photovoltaïque était jusqu'alors excessivement chère et la technologie non encore maîtrisée. Cependant avec la baisse régulière au plan du marché mondial des équipements solaire et la réduction prochaine des taxes à l'importation dans notre espace, cette énergie constitue une alternative sérieuse face à la source thermique.

#### **V.4. La biomasse**

L'autre possibilité dont dispose le pays est la promotion de la biomasse. Pour cette solution le pays dispose d'énormes étendues de terre cultivables et une main d'œuvre aguerrie au travail de la terre. De plus les champs de plantes énergétiques étant emblavées en milieu rurale cela permettra d'apporter un revenu supplémentaire aux populations rurales et bénéficier des retombés de la transformation de ces plantes. Le biocarburant issue de la biomasse étant utilisable dans les machines agricoles et dans la production d'électricité par cogénération. Le pays s'est déjà engagé dans la production agricole pour le biocarburant avec la culture du jatropha.

#### **V.5. L'importation d'énergie**

L'importation d'énergie figure en bonne partie dans les projets d'accroissement de l'offre d'électricité de la SONABEL. Ceci est encouragé par les grands projets à l'échelle régionale

UEMOA, CEDEAO et guidé par un souci de mutualisation des énergies pour atteindre l'objectif d'un meilleur accès des populations à l'électricité. Les projets prévus sont :

Le projet d'interconnexion électriques Bolgatanga – Ouagadougou, Han – Bobo – Dioulasso – Sikasso – Bamako. La ligne Bolgatanga – Ouagadougou devrait déjà être opérationnelle en 2012 et en 2015-2016 la ligne Han – Bobo – Sikasso – Bamako.

Le projet d'interconnexion électrique Nigéria – Niger – Burkina Faso – Benin. La réalisation de cette ligne longue de 1000 km est prévue en 2017-2018 et coûtera au Burkina Faso environ 150 millions de dollars<sup>13</sup>.

Les études de faisabilités et les études environnementales de ces projets ont été réalisées.

Cette partie nous a permis de parcourir les projets de SONABEL et de connaître les orientations de celle-ci en matière d'augmentation de l'approvisionnement du pays en matière d'électricité. Il s'agit à n'en point douter de projets savamment élaborés et judicieusement choisis en fonction des contingences du moment et des réalités nationales et supranationales en relations avec les structures régionales.

Toutefois dans la partie qui suivra, loin de nous l'idée de remettre en cause ce qui a déjà été projeté, nous essayerons d'apporter notre façon de percevoir l'avenir de la SONABEL en termes d'offre énergétique.

---

<sup>13</sup> Note sectorielle sur l'énergie.

## **VI. PROPOSITIONS ET RECOMMANDATIONS POUR LE DEVELOPPEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES**

Il s'agit dans cette partie de l'étude de donner les raisons et justification de notre choix de nous orienter dans le sens de l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans l'offre énergétique de la SONABEL

### **VI.1. Pourquoi développer les énergies renouvelables ?**

Pour privilégier le développement des énergies renouvelables en Afrique d'une façon générale et dans notre pays en particulier, il serait donc possible de partir des arguments suivants :

- Un renforcement de la sécurité énergétique découlant d'une réduction de l'exposition au risque de flambée des prix du pétrole à l'importation et des fréquentes pénuries d'électricité hydraulique liées à la sécheresse.
- La disponibilité de ressources renouvelables abondantes et compétitives comme la petite hydraulique, le solaire, la géothermie et la cogénération.
- La possibilité de fournir des services énergétiques à des coûts compétitifs à des populations rurales isolées, à l'écart du réseau électrique.
- Un potentiel significatif de créations d'emplois et d'entreprises lié aux renouvelables et aux initiatives d'efficacité énergétique

#### **VI.1.1. Les raisons environnementales et éthiques pour le Burkina Faso**

- L'énergie renouvelable n'est pas limitée par l'épuisement de son gisement (sauf pour la biomasse, comme le bois). Elle connaît toutefois d'autres limites (superficie nécessaire, infrastructures, rendement, intermittence, stockage, etc...).
- La production de gaz à effet de serre est très inférieure à celle des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz). Dans le cas de la biomasse, le gaz carbonique produit par la conversion thermochimique (combustion) du méthane, 10 fois plus nocif du point de vue "effet de serre", et est normalement compensé par la réabsorption par la flore.

- Les déchets produits par un système de production d'énergie renouvelable sont essentiellement des déchets de démantèlement des installations de production en fin de vie, au contraire des centrales thermiques à hydrocarbures ou nucléaires.
- De façon "cachée", les énergies renouvelables émettent toutefois des gaz à effet de serre, notamment lors de la production des dispositifs d'exploitation énergétiques (panneaux solaires, éoliennes, etc...). Ces émissions sont très inférieures à celles des énergies fossiles, mais du même ordre de grandeur que celles de l'électricité d'origine nucléaire<sup>14</sup>.

### **VI.1.2. Les raisons économiques et financières**

Il y a une valeur carbone pour ce type d'énergie. Cette compensation carbone permet de rattraper en partie l'investissement du fait de l'apport financier de cette compensation.

Le démantèlement des systèmes de production d'énergie renouvelable est facile, rapide et peu coûteux.

Les déchets sont peu coûteux. Puisqu'ils sont peu abondants et réutilisables pour la plupart.

Les systèmes hydroélectriques et solaires nécessitent peu d'entretien après leur installation. Ce qui constitue un gain en termes de frais d'entretien et de coût d'exploitation.

### **VI.1.3. La disponibilité de la ressource**

#### *Pour l'hydroélectricité*

Le potentiel initial des pays développés a été largement exploité, et les possibilités de nouveaux barrages hydroélectriques y sont limitées. En revanche, l'Afrique est loin d'avoir développé tout son potentiel hydroélectrique. Le développement des ressources hydroélectriques d'Afrique de l'Ouest n'est pas achevé et doit être entrepris comme une priorité, en intégrant les préoccupations relatives à la préservation des écosystèmes. Suivant une étude UEMOA, les sept états membres de l'Union auraient un potentiel de 2.837 MW, dont seulement 32,5% sont exploités

En dehors de site existants un inventaire des sites potentiels à été fait par la SONABEL à travers une étude réalisée par EDF. Au terme de cet inventaire 67 sites aménageables sur l'ensemble du pays ont été identifiés. Après différentes analyses 9 sites ont été retenus pour leur intérêt économique et stratégique. Ces sites sont de deux types : 5 sites aménageables

---

<sup>14</sup> [www.techno-science.net](http://www.techno-science.net)

pour la production hydroélectrique et 4 sites aménageables pour plusieurs utilisations à savoir l'hydroélectricité, l'irrigation, l'eau potable, développement économique local.<sup>15</sup>

Tableau 7 : Tableaux récapitulatif des sites

- Aménagements hydroélectriques

Sites	Puissance installée mW	Productible annuel gWh	Coût de revient du kWh en FCFA
BON	7,8	29,1	73
BONTIOLI	5,1	11,7	99
GOUGOUROU	5	17,7	104
FOLONZO	10,8	27,3	110
BAGRE AVAL	14	37,3	118
TOTAL	42,7	123,1	

- Aménagements à but multiples (hydroélectricité, irrigation, eau potable, développement)

Sites	Puissance installée mW	Productible annuel gWh	Coût de revient du kWh en FCFA
SAMENDENI	2,4	11,2	175
BITTOU	1,6	6,2	210
KIRGOU	2,1	9,9	222
BADONGO	3	10,2	223

Sources : Etude SONABEL

Le coût de revient du kWh du produit pour le deuxième tableau est donné sans prendre en compte la valorisation des autres services fournis.

### ***Pour le solaire***

L'ensoleillement moyen en Afrique de l'Ouest représente un potentiel d'environ 5 à 6 kWh/m<sup>2</sup>/jour, contre seulement 3 kWh/m<sup>2</sup>/jour en zone tempérée européenne. L'importance de l'ensoleillement et la perspective réelle mais lente de réduction des coûts de la technologie photovoltaïque ont conduit à prévoir une contribution très significative de l'énergie solaire pour l'accès des populations rurales à un service électrique de base. Il constitue la ressource la plus abondante au Burkina Faso avec 8,3 heures d'insolation par jour. Alors, l'exploitation de l'énergie solaire à grande échelle serait intéressante avec la baisse des coûts de la technologie.

<sup>15</sup> Etude d'inventaire des sites hydroélectriques du Burkina Faso

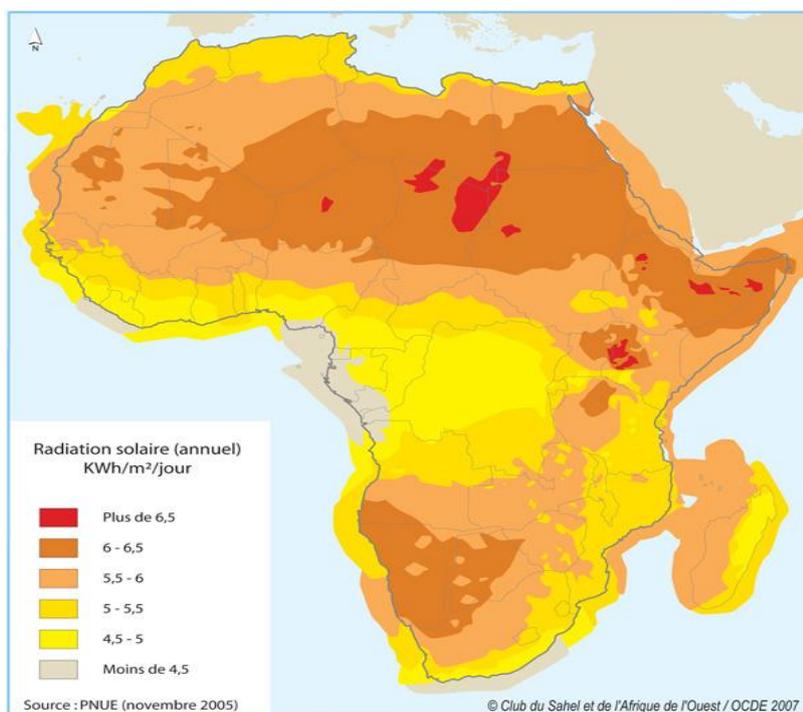
Cette tendance est réelle en raison de la baisse des coûts des équipements solaires au plan mondial et de l'exonération consentie par les pays de l'UEMOA sur les équipements en raison de la volonté politique affichée d'améliorer la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité de nos pays.

Les recherches en cours s'orientent dans le sens d'une amélioration des rendements des cellules photovoltaïques en recherchant des formes cristallines de silicium ou d'autres semi-conducteurs capables d'aller au-delà des meilleurs rendements actuels (15 %) ;

L'énergie solaire est surabondante, et la parité du coût de l'électricité solaire avec le coût de l'électricité à base de produits pétroliers dans un pays enclavé, est sur le point d'être atteinte.

Il n'y a donc plus de raison de ne pas s'y investir plus.

#### Carte d'ensoleillement de l'Afrique



#### ***Pour les autres sources renouvelables***

Les principes des technologies des énergies renouvelables sont au point, mais il y a encore beaucoup à attendre de la recherche au plan de l'amélioration de l'efficacité des techniques, par exemple :

- Apprendre à mettre en place des parcs éoliens en mer au moindre coût ;
- Améliorer la productivité des plantes destinées aux carburants verts et rendre la totalité de la plante utilisable ;
- Améliorer les processus de gestion de l'énergie électrique pour mieux intégrer au réseau l'électricité issue des énergies intermittentes comme le vent et le soleil
- La filière biomasse-électricité traditionnelle dans les sites agroindustriels ou forestiers, conserve toute sa valeur. D'autres développements en biomasse-électricité, restent à explorer.

#### **VI.1.4. Les considérations géopolitiques et d'indépendance**

La facture énergétique du pays est très lourde du fait de l'importation de produits pétroliers. Le Burkina Faso n'est pas un pays producteur de produits pétroliers. Il ne dispose pas non plus d'installations de raffinage de pétrole brut. Il dépend, pour ses approvisionnements en hydrocarbures, des raffineries et des terminaux pétroliers des pays limitrophes ayant un accès à la mer (Côte d'Ivoire, Bénin, Togo et Ghana). Les subventions des hydrocarbures au Burkina Faso oscillent entre 20 et 30 milliards de FCFA, en fonction des cours du pétrole. Elles concernent précisément le DDO et le fuel-oil utilisés par la SONABEL pour la production de l'électricité, et le gaz butane destiné aux ménages<sup>16</sup>. Elles s'élèvent à 95 FCFA/litre pour le DDO et à 177 FCFA/litre pour le fuel-oil ; elles permettent ainsi à la SONABEL de mieux assurer ses missions de service public en appliquant des prix du kilowatt/heure moins élevés pour le consommateur et en accroissant ses investissements en faveur de l'électrification. Au regard de cette situation une des solutions pourrait être la diversification de la production en développant les énergies renouvelables. Ceci aura pour conséquence immédiate une économie sur la consommation des combustibles, un gain sur les coûts de transport de cette énergie, et tous les autres avantages liés à l'utilisation des ressources renouvelables cités plus haut.

<sup>16</sup>1 Décision n°01/98-CM/UEMOA du 3 juillet 1998

*Etat des lieux de l'approvisionnement en hydrocarbures au Burkina Faso*

UEMOA – Etude sur l'amélioration de l'approvisionnement en hydrocarbures Page 17

## VI.2. Propositions et recommandations

Le Burkina Faso devrait s'orienter vers les énergies pour lesquelles il a un avantage concurrentiel en terme de disponibilité de la ressource afin d'apporter une part substantielle dans l'échange d'énergie à l'échelle régionale. Le développement précédent on permet de révéler l'immense potentiel que le Burkina Faso a en matière de ressources hydroélectrique et solaire. Certains pays de la sous-région qui disposent d'assez de ressource en eau pourront se spécialiser dans la production hydro électrique pendant que les pays sahéliens ayant beaucoup de soleil pourront en faire un usage intensif. Pour le Burkina Faso, en plus du soleil, une grande partie du territoire est propice à la culture de plantes énergétiques et à la biomasse.

L'exploitation de ces avantages naturels pour les pays de la région pourrait par la suite ouvrir la voie à une mutualisation de ressources à travers les interconnexions et les importations ou exportations d'énergies d'un pays à l'autre. Cette stratégie est d'ailleurs recommandée par les institutions régionales notamment l'UEMOA et la CEDEAO dont notre pays est partie prenante. Il s'agit ici de créer un marché régional d'énergie électrique en tirant de chaque pays les meilleures opportunités en coût de production. Pour atteindre cet objectif un certain nombre de facteurs motivants existe déjà à savoir la volonté politique et le changement de mentalité qui se traduit par une prise de conscience de la nécessité de rechercher des sources d'énergie nouvelles et durables. Il s'agira d'approfondir la réflexion pour mettre en place les mécanismes pour aboutir à ce mix énergétique profitable à tous. Notre contribution à cette réflexion pourrait aller dans le sens de :

- Développer l'expertise nationale et régionale dans le domaine des énergies renouvelables surtout en ce qui concerne le solaire et la biomasse. Approfondir la recherche sur le thermique solaire et les autres applications de cette ressource.
- Construire des centrales solaires photovoltaïques dans les régions du pays en vue d'injecter la production dans le réseau national interconnecté. Exemple celle de Kaya qui constitue notre étude de cas.
- Développer à cote des sites de barrages hydroélectriques des centrales solaires en vue d'une complémentarité et la réduction des coûts d'exploitation.
  - La centrale solaire qui fonctionnera tant qu'il ya du soleil permettra de ne pas turbiner engendrant ainsi une économie d'eau.

- Certains équipements tels que les postes de ces centrales existantes pourront servir pour les deux types de centrales pour l'évacuation de l'énergie produite.
  - Le personnel de la centrale existante pourra être recyclé pour l'adapter aux deux types de production.
  - Les centrales hydroélectriques étant généralement éloignés des agglomérations, on peut aisément trouver de l'espace disponible pour les installations solaires.
- Développer également à côté des principales centrale thermiques des centrales solaires en vue d'utiliser certains équipements et le personnel en communs ce que aura pour avantage de :
- Réduire les coûts d'exploitation et même de l'investissement initial.
  - De permettre une économie de combustible pendant le fonctionnement de la centrale solaire.
  - De ménager les groupes thermiques et d'augmenter leur durée de vie du fait que leur durée de fonctionnement est réduite par le fonctionnement de la centrale solaire.

Il faudra donc dès à présent prévoir de l'espace au niveau des nouvelles centrales thermiques à cet effet.

- Envisager l'alimentation des régions isolées par de longue distance particulièrement au sahel par des centrales solaires en raison de l'abondance de l'ensoleillement et de vastes étendues de terrains disponibles
- Pour les applications de petite taille (capacité équivalant à moins de 5 kW), se concentrer sur la promotion des chauffe-eau solaires, des pompes éoliennes et du solaire photovoltaïque pour une utilisation dans des institutions rurales isolées comme des dispensaires, des missions, des hôpitaux et des écoles rurales ainsi que des équipements liés au tourisme dans les zones naturelles.
- Au niveau domestique, privilégier les renouvelables non électriques comme les cuisinières à biocombustible améliorées qui entraînent d'importantes économies et des avantages en termes de réduction de la pollution de l'air intérieur.
- Pour notre pays, où d'importantes populations pauvres dépendent de l'agriculture, une priorité devrait être accordée à l'utilisation efficace des déchets agricoles existants pour la production d'énergie. C'est l'option qui présente le moins d'inconvénients pour les pauvres et pourrait apporter des revenus complémentaires aux communautés rurales pauvres. Elle exige de mettre en place un cadre légal et réglementaire permettant le

développement d'une exploitation énergétique moderne de la biomasse à partir des résidus agricoles et fournissant, entre autres avantages, un accès au réseau électrique et la production du carburant.

- Les importations d'énergie doivent être renforcées et mettre l'accent sur les sources hydroélectriques. Ceci a pour avantage de faciliter le transport et réduire les coûts étant donné que le transport d'énergie sous sa forme combustible entraîne des surcoûts.
- Projets éligibles au Mécanisme de développement propre. L'adhésion à ce mécanisme permettra au pays d'en tirer des revenus qui serviront à amortir l'investissement dans les projets éligibles.

## CONCLUSION

L'énergie constitue un des éléments essentiels de notre civilisation matérielle et l'homme devra faire appel à des ressources énergétiques toujours plus considérables et bon marché s'il veut continuer à élever son niveau de vie. Les sources d'énergie classiques pourraient s'épuiser et il paraît maintenant indispensable de mettre tout en œuvre pour tirer parti, dans un avenir prochain, de nouvelles sources naturelles et inépuisables. La recherche de nouvelles sources d'énergie s'impose donc sous l'angle du bilan énergétique mondial. Mais il est un autre élément qui joue dans le même sens, c'est la répartition très inégale des sources d'énergie classiques : charbon, pétrole et forces hydrauliques. La possibilité de recourir à d'autres formes : soleil, vent biomasse ou marées pour certaines contrées accroîtrait la diversité et réduirait les inégalités actuelles entre les pays, ce qui serait bénéfique, à coup sûr, pour les pays insuffisamment développés. Par ailleurs, en dehors du bilan global, il faut noter que les diverses formes d'énergie ont des caractéristiques différentes, d'où il résulte que l'utilisation de ressources nouvelles enrichirait la gamme des possibilités offertes à l'homme pour alléger sa tâche et améliorer ses conditions d'existence.

Au terme de cette réflexion nous pensons que le salut de la SONABEL se situe dans une combinaison rationnelle des différentes sources d'énergie. Nous gagnerons à augmenter de façon substantielle la part des énergies renouvelables, particulièrement le solaire et l'hydroélectricité, pour tendre vers un mix énergétique a même d'apporter un équilibre et une certaine sécurité dans notre système d'approvisionnement en électricité. Notre objectif à terme est l'évolution vers une offre d'énergie durable et respectueuse de l'environnement.

A l'échelle régionale, l'offre énergétique permettra de satisfaire de façon durable une demande dynamisée par une énergie moins coûteuse et plus compétitive, à partir de trois sources majeures : l'hydro-électricité qui aura fait l'objet d'investissements très importants, les énergies renouvelables (solaire, biomasse, éolien) mais aussi les échanges d'énergie.

## BIBLIOGRAPHIE

- 1- Rapports annuels d'activité 2009, 2010, 2011 SONABEL.
- 2- Inventaire des sites hydroélectrique du Burkina faso.
- 3- Etude de faisabilité de la centrale solaire photovoltaïque de Zagtouli ; Mai 2011 ; Ressources and logistics et UE.
- 4- Rapports d'activités annuels de la direction de la production ; SONABEL
- 5- Livre blanc pour une politique régionale ; CEDEAO/ UEMOA ; Janvier 2006
- 6- Support de cours énergie, et enjeux environnementaux 2IE ; Yezouma COULIBALY, 2ie.
- 7- Apertet J. De nouvelles sources d'énergie pour les pays insuffisamment développés  
In: Tiers-Monde. 1961, tome 2 n°5. pp.
- 8- Feuille de route pour la réalisation de la vision UEMOA 2030
- 9- Etude sur l'amélioration de l'approvisionnement en hydrocarbures ; UEMOA
- 10- OUEDRAOGO L. UEMOA ; Note synthétique sur la situation de l'union
- 11- PEC, UEMOA ; Politique énergétique commune de l'UEMOA ; Novembre 2011
- 12- Etude pour l'élaboration d'une stratégie de résolution durable de la crise de l'énergie électrique dans les états membres de l'UEMOA ; Rapport définitif, Août 2008.
- 13- OUEDRAOGO L. panorama du secteur de l'énergie dans l'UEMOA quelle source énergétique faut-il privilégier ; juin 2011.
- 14- Note sectorielle sur l'énergie au Burkina Faso ; Direction de la Prospective et de l'Intelligence Economique (DPIE), chambre de commerce du Burkina Faso ; octobre 2010

### Sites webs :

- 1- [www.techno-science.net](http://www.techno-science.net)
- 2- Site dictionnaire wikipédia
- 3- [www.materre.fr](http://www.materre.fr)
- 4- [www.techno-com.net](http://www.techno-com.net)
- 5- [www.oscenviro.bf](http://www.oscenviro.bf)[www.sonabel.bf](http://www.sonabel.bf)
- 6- [www.prs-burkinafaso.com](http://www.prs-burkinafaso.com)
- 7- [www.insd.bf](http://www.insd.bf)
- 8- <http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/tiers>.

# ANNEXES

## SOMMAIRE DES ANNEXES

Annexe 1 : Simulation PSYS.....	60
Annexe 2 : Simulation Sunny design.....	63
Annexe 3 : les critères de détermination des sites hydroélectriques.....	65
Annexe4 :Coût de l'électricité en Afrique.....	66
Annexe 6 : Simulation PVGIS.....	68
Annexe 7 : Le parc de production thermique des principales centrales de la SONABEL.....	70

Annexe 1 : Simulation PSYS

PVSYS V5.65		08/06/13		Page 1/3	
<b>Système couplé au réseau: Paramètres de simulation</b>					
<b>Projet :</b>	Centrale solaire de Kaya				
<b>Site géographique</b>	<b>Kaya</b>	<b>Pays</b>	<b>BURKINA FASO</b>		
<b>Situation</b>	Latitude	13.1°N	Longitude	1.1°W	
Temps défini comme	Temps légal	Fus. horaire TU+0	Altitude	330 m	
	Albédo	0.20			
<b>Données météo :</b>	Kaya de NASA-SSE, Données horaires synthétiques				
<b>Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation</b>					
	Date de la simulation	08/06/13 à 16h08			
<b>Paramètres de simulation</b>					
<b>Orientation plan capteurs</b>	Inclinaison	15°	Azimut	0°	
<b>20Sheds</b>	Espacement	6.80 m	Largeur collecteurs	3.00 m	
Bande inactive	Haut	0.00 m	Bas	0.00 m	
Angle limite d'ombrage	Gamma	11.84 °	Taux d'occupation	45.5 %	
<b>Horizon</b>	Pas d'horizon				
<b>Ombrages proches</b>	Ombrage mutuel des sheds				
<b>Caractéristiques du champ de capteurs</b>					
<b>Module PV</b>	Si-poly	Modèle	<b>REC 245PE</b>		
		Fabricant	REC		
Nombre de modules PV		En série	24 modules	En parallèle	1701 chaînes
Nombre total de modules PV		Nbre modules	40824	Puissance unitaire	245 Wc
Puissance globale du champ		Nominale (STC)	<b>10002 kWc</b>	Aux cond. de fonct.	9098 kWc (50°C)
Caractéristiques de fonct. du champ (50°C)		U mpp	649 V	I mpp	14012 A
Surface totale		Surface modules	<b>67360 m²</b>	Surface cellule	59610 m²
<b>Onduleur</b>		Modèle	<b>Powador XP500-HV TL</b>		
		Fabricant	KACO new energy		
Caractéristiques		Tension de fonctionnement	550-830 V	Puissance unitaire	500 kW AC
Batterie d'onduleurs		Nombre d'onduleurs	18 unités	Puissance totale	9000 kW AC
<b>Facteurs de perte du champ PV</b>					
Fact. de pertes thermiques		Uc (const)	20.0 W/m²K	Uv (vent)	0.0 W/m²K / m/s
=> Tempér. de fonct. nominale (G=800 W/m², Tamb=20°C, Vent=1m/s.)				NOCT	56 °C
Perte ohmique de câblage		Rés. globale champ	0.77 mOhm	Frac. pertes	1.5 % aux STC
Perte de qualité module				Frac. pertes	0.1 %
Perte de "mismatch" modules				Frac. pertes	2.0 % au MPP
Effet d'incidence, paramétrisation ASHRAE		IAM =	1 - bo (1/cos i - 1)	Paramètre bo	0.05
<b>Besoins de l'utilisateur :</b>	Charge illimitée (réseau)				

Système couplé au réseau: Résultats principaux

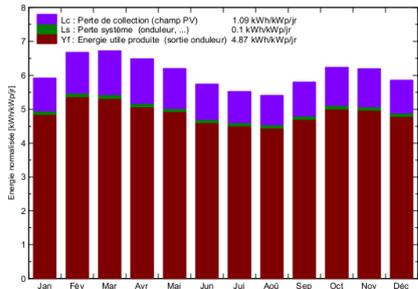
Projet : Centrale solaire de Kaya

Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation

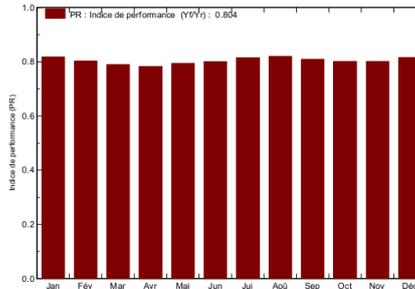
Principaux paramètres système		Type de système	Couplé au réseau	
Orientation plan capteurs	Disposition en sheds, inclinaison	15°	azimut	0°
Modules PV	Modèle	REC 245PE	Pnom	245 Wc
Champ PV	Nombre de modules	40824	Pnom total	10002 kWc
Onduleur	Modèle	Powador XP500-HV TL	Pnom	500 kW ac
Batterie d'onduleurs	Nombre d'unités	18.0	Pnom total	9000 kW ac
Besoins de l'utilisateur	Charge illimitée (réseau)			

Principaux résultats de la simulation	
Production du système	Energie produite 17785 MWh/an
Indice de performance (PR)	Productible 1778 kWh/kWc/an 80.4 %

Productions normalisées (par kWp installé): Puissance nominale 10002 kWc



Indice de performance (PR)



Nouvelle variante de simulation

Bilans et résultats principaux

	GlobHor	T Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	EffArrR	EffSysR
	kWh/m²	°C	kWh/m²	kWh/m²	MWh	MWh	%	%
Janvier	161.2	24.20	183.6	177.3	1534	1502	12.40	12.15
Février	170.5	26.40	187.1	181.2	1533	1503	12.16	11.93
Mars	202.4	29.80	208.6	201.8	1682	1647	11.97	11.72
Avril	200.7	32.10	194.4	187.5	1551	1521	11.85	11.61
Mai	207.7	31.30	192.4	185.2	1558	1527	12.02	11.78
Juin	190.8	28.50	172.4	165.4	1409	1381	12.14	11.89
Juillet	186.3	26.00	171.3	164.3	1426	1396	12.36	12.10
Août	174.8	25.60	167.6	161.1	1406	1375	12.45	12.18
Septembre	173.7	27.10	174.0	167.8	1439	1409	12.28	12.02
Octobre	181.4	29.10	193.6	187.1	1585	1552	12.16	11.90
Novembre	163.8	28.10	186.0	180.0	1521	1490	12.14	11.90
Décembre	156.5	25.10	181.7	175.7	1514	1482	12.37	12.11
Année	2169.8	27.77	2212.6	2134.4	18158	17785	12.18	11.93

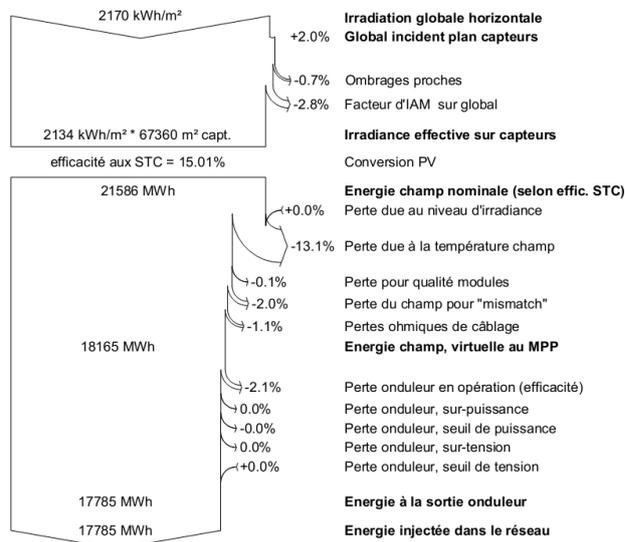
Légendes:	GlobHor	Irradiation globale horizontale	EArray	Energie effective sortie champ
	T Amb	Température ambiante	E_Grid	Energie injectée dans le réseau
	GlobInc	Global incident plan capteurs	EffArrR	Effic. Eout champ / surf. brute
	GlobEff	Global "effectif", corr. pour IAM et ombrages	EffSysR	Effic. Eout système / surf. brute

### Système couplé au réseau: Diagramme des pertes

**Projet :** Centrale solaire de Kaya  
**Variante de simulation :** Nouvelle variante de simulation

Principaux paramètres système	Type de système	Couplé au réseau	
Orientation plan capteurs	Disposition en sheds, inclinaison	15°	azimut 0°
Modules PV	Modèle	REC 245PE	Pnom 245 Wc
Champ PV	Nombre de modules	40824	Pnom total <b>10002 kWc</b>
Onduleur	Modèle	Powador XP500-HV TL	Pnom 500 kW ac
Batterie d'onduleurs	Nombre d'unités	18.0	Pnom total <b>9000 kW ac</b>
Besoins de l'utilisateur	Charge illimitée (réseau)		

#### Diagramme des pertes sur l'année entière



## Annexe 2 : Simulation Sunny design

KY Jean Baptiste • SONABEL

SONABEL

KY Jean Baptiste  
SONABEL

Tél. : 00226 70 23 01 13  
E-mail: jbaptisteky@yahoo.fr

**Nom du projet:** Centrale solaire PV de Kaya      **Site:** Burkina Faso / Ouagadougou  
**Numéro de projet:** 001  
**Fichier de projets:** Tension du réseau: 3~33 kV

### Aperçu du système

#### 43472 x REC REC230PE (BLK) (Générateur PV 1)

Azimut: 0°, Inclinaison: 15°, Type de montage: Installation libre, Puissance de crête: 10,00 MWp

16 x SC 500HE-20

### Données techniques

Nombre total de panneaux photovoltaïques:	43472	Facteur d'util. de l'énergie:	99,7 %
Puissance de crête:	10,00 MWp	Indice de performance (env.)*:	84,8 %
Nombre d'onduleurs:	16	Rendement énergétique spécifique (environ)*:	1913 kWh/kWp
Puissance AC nominale:	8,00 MW	Pertes dans les lignes (en % de l'énergie photovoltaïque):	---
Puissance active AC:	8,00 MW	Alimentation triphasée:	0,00 VA
Rapport de puissance active:	80 %	Autoconsommation:	---
Rendement énergétique annuel (environ)*:	19125,89 MWh	Pourcentage d'autoconsommation:	---

Sunny Design 2.30.0.R

Signature

\*Important : Les valeurs de rendement affichées sont des valeurs estimatives. Elles sont calculées mathématiquement. SMA Solar Technology AG décline toute responsabilité en cas de valeurs réelles de rendement qui pourraient diverger des valeurs de rendement indiquées ici. Les raisons de ces différences dépendent de différentes conditions extérieures, p. ex. des salissures des modules photovoltaïques ou des variations des rendements des modules photovoltaïques.

## Évaluation de la configuration

**Nom du projet:** Centrale solaire PV de Kaya

Numéro de projet: 001

Fichier de projets:

**Projet partiel 1**

**Site:** Burkina Faso / Ouagadougou

**Température cellule:**

Température minimale: -10,00 °C

Temp. de configuration: 50,00 °C

Température maximale: 70,00 °C

### 16 x SC 500HE-20

Puissance de crête:	10,00 MWp
Nombre total de panneaux photovoltaïques:	43472
Nombre d'onduleurs:	16
Puissance DC max. (cos φ = 1):	509,00 kW
Puissance active AC max. (cos φ = 1):	500,00 kW
Tension du réseau:	33 kV
Rapport de puissance nominale:	81 % <span style="color: green;">✔</span>
Facteur de déphasage (cos φ):	1



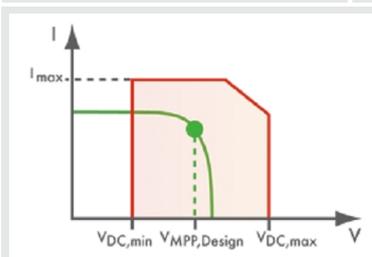
SC 500HE-20

### Données techniques

#### Entrée A: Générateur PV 1

2717 x REC REC230PE (BLK), Azimut: 0°, Inclinaison: 15°, Type de montage: Installation libre

	Entrée A:		
Nombre de strings:	143		
Panneaux photovoltaïques par string:	19		
Puissance de crête (entrée):	624,91 kWp		
Tension photovoltaïque caractéristique:	500 V <span style="color: green;">✔</span>		
Tension photovoltaïque min.:	454 V <span style="color: green;">✔</span>		
Tension DC min. (Tension du réseau 33 kV):	430 V		
Tension photovoltaïque max.:	787 V <span style="color: green;">✔</span>		
Tension DC max. (Photovoltaïque):	1000 V		
Courant du générateur PV max:	1115,4 A <span style="color: green;">✔</span>		
Courant DC max.:	1250,0 A		



Compatibilité PV/onduleur

Sunny Design 2.30.0.R

### ANNEXE 3 : Les critères de détermination des sites hydroélectriques

- Le productible moyen annuel théorique : Traduit l'importance du site en intégrant les apports moyens annuels et la hauteur de chute théorique de l'aménagement. Dans le classement on lui attribue un coefficient 2 au regard de son importance.

Mode de calcul :  $P(\text{GWh}) = \text{apports moyens annuels (en hm}^3) * H(\text{en m}) * \text{coefficient de rendement de l'unité.}$

Soit P : le productible annuel théorique

H : La hauteur de chute théorique

RN : retenue normale

H = cote de RN - cote de restitution

Coefficient de rendement et d'unité = 8 / 3600

La répartition des sites en groupe est telle que :

Groupe micro centrale :  $P < 5 \text{ GWh}$

Groupe mini-centrales :  $5 \text{ GWh} < P < 15 \text{ GWh}$

Groupe centrales importantes :  $P > 15 \text{ GWh}$

La régularité des débits du cours d'eau : Critère exprimé par le nombre de mois sans écoulement du cours d'eau au niveau du site. Soit N le nombre de mois sans écoulement. Le système de notation est

1 =  $N > 6$

2 =  $4 < N < 6$

3 =  $1 < N < 3$

4 = cours d'eau permanent

- L'importance des ouvrages de retenue : directement lié au coût final de l'aménagement elle a la même importance que le productible et affecté du coefficient 2.

Son mode de calcul du volume réel :  $V = \alpha * L * H^2$

V : volume réel du barrage

L : longueur en crête

H : hauteur

$\alpha$  : coefficient caractérisant la forme du profil longitudinal et en travers du barrage.

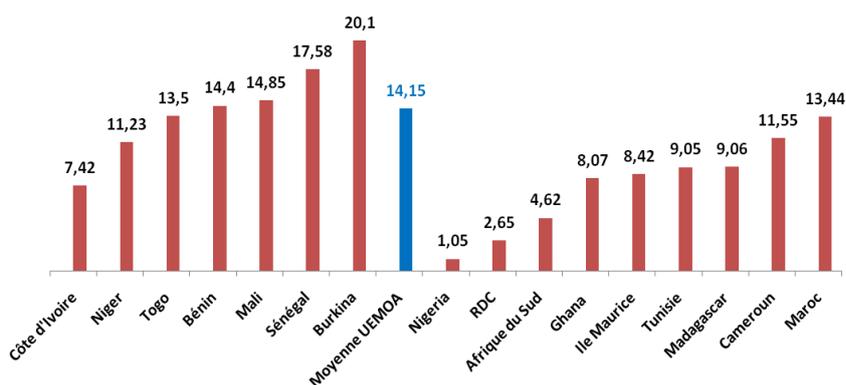
La valeur  $L * H^2$  est représentative du volume du barrage de l'aménagement projeté

- Le contexte géologique : le critère de notation est tel que : 1 = contexte écologique peu favorable, 2 = contexte écologique moyen, 3 = contexte écologique favorable.
- La longueur de la ligne de transport d'énergie : Critère très important parce qu'il peut remettre en cause l'intérêt d'un aménagement si la ligne à construire est trop longue par rapport à la puissance fournie
- Le contexte environnemental : Apprécie les effets négatifs liés à la retenue lorsqu'elle affecte des zones habitées.

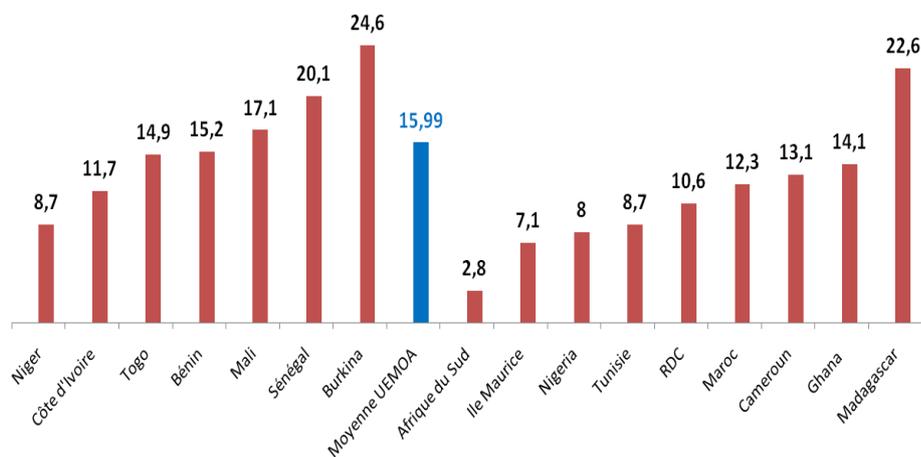
## ANNEXE 4 : Coût de l'électricité en Afrique

Le coût de l'électricité dans les pays de l'UEMOA est un des plus chers au monde

Comparaison des tarifs d'électricité à usage social appliqués en Afrique (en cents US/kWh)



Comparaison des tarifs d'électricité Moyenne Tension appliqués en Afrique (en cents US/kWh)



Source : Étude comparative des tarifs d'électricité pratiqués en Afrique, UPDEA, octobre 2007 (Les prix indiqués comprennent les taxes)

## ANNEXE 5 : Le Rayonnement solaire

### Intensité et disponibilité du rayonnement solaire dans l'UEMOA

Pays	Moyenne annuelle du rayonnement solaire sur le plan horizontal (kWh /m <sup>2</sup> /jour)	Moyenne journalière d'insolation (h)
Bénin	3.9-6.1	6-8
Burkina Faso	2-7.8	6-10
Côte d'Ivoire	4-5	6-8
Guinée Bissau	4.5-5.5	6-8
Mali	5-7	6-9
Niger	5-7	7-10
Sénégal	4.3-6.9	6-10
Togo	4.4-4.5	6-8

Source UEMOA : Etude sur la relance de l'ex CRES de Bamako – rapport définitif 2009

### Potentiel solaire en Afrique de l'Ouest

Pays	Jan	Fev	Mar	Av	Mai	Ju	Jui	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Moy An
Sénégal	4,74	5,41	6,33	6,79	6,78	6,53	6,11	5,65	5,52	5,38	5	4,42	5,72
Mali1	5,01	5,86	6,36	6,54	6,35	6,08	5,51	5,38	5,59	5,6	5,46	4,98	5,72
Mali2	4,32	5,47	6,47	7,24	7,57	7,33	7,15	6,92	6,61	5,9	4,75	4,01	6,14
Niger1	5,63	6,53	7,08	7,31	7,26	6,98	6,53	6,26	6,4	6,44	6,05	5,4	6,48
Niger2	4,9	6,12	6,82	7,54	7,58	7,59	7,51	7,3	7,05	6,44	5,47	4,74	6,58
Nigéria	5,88	6,09	6,27	6,06	5,58	5,05	4,44	4,19	4,73	5,31	5,98	5,86	5,44
Benin	5,57	6,15	6,18	6,22	5,94	5,34	4,8	4,61	5,01	5,64	5,8	5,76	5,58
Togo	5,61	5,88	5,8	5,66	5,4	4,84	4,44	4,22	4,58	5,18	5,5	5,53	5,21
Ghana	5,61	5,8	5,88	5,74	5,47	4,88	4,55	4,38	4,55	5,19	5,4	5,38	5,23
Libéria	5,17	5,33	5,35	5,12	4,86	4,33	3,99	3,94	4,25	4,67	4,7	4,86	4,71
Siéra Léone	5,45	5,94	6,05	5,72	5,16	4,69	4,3	4,09	4,55	4,79	4,78	5,13	5,04
Guinée	5,72	6,25	6,46	6,43	5,93	5,35	4,94	4,8	5,05	5,24	5,44	5,6	5,59
Guinée bissau	5,41	5,94	6,58	6,84	6,58	5,64	5,21	4,95	5,05	5,15	5,32	5,21	5,65
Cap-vert	5,25	5,77	6,81	7,24	7,09	6,69	6,48	6,22	5,93	5,86	5,21	4,86	6,11
Mauritanie1	4,76	5,57	6,81	7,51	7,7	7,3	7,36	7	6,3	5,85	4,82	4,38	6,28
Mauritanie2	3,95	5	6,17	6,76	7,3	7,15	7,18	6,61	5,89	5,05	4,19	3,51	5,73
Burkina Faso	5,16	6,03	6,35	6,43	6,39	5,94	5,6	5,28	5,54	5,78	5,56	5,09	5,75
Gambie	4,96	5,48	6,16	6,63	6,58	5,97	5,51	5,18	5,14	5,25	5,15	4,71	5,55
Côte d'Ivoire	5,55	5,8	5,79	5,62	5,32	4,66	4,36	4,26	4,33	4,71	4,83	5,14	5,02

## Annexe 6 : Simulation PVGIS

### Performance du système PV connecté au réseau

#### PVGIS estimation de la production d'électricité solaire

Site: 12°33'16" Nord, 1°34'55" Ouest, Élévation: 306 m.s.n.m,

Base de données de radiation solaire employée: PVGIS-helioclim

Puissance nominale du système PV: 10000.0 kW (silicium cristallin)

Pertes estimées à cause de la température et des niveaux faibles de rayonnement: 15.0%  
(employons température ambiante locale)

Pertes estimées à cause des effets de la réflectance angulaire: 2.5%

D'autres pertes (câble, onduleur, etc.): 14.0%

Pertes conjuguées du système PV: 28.8%

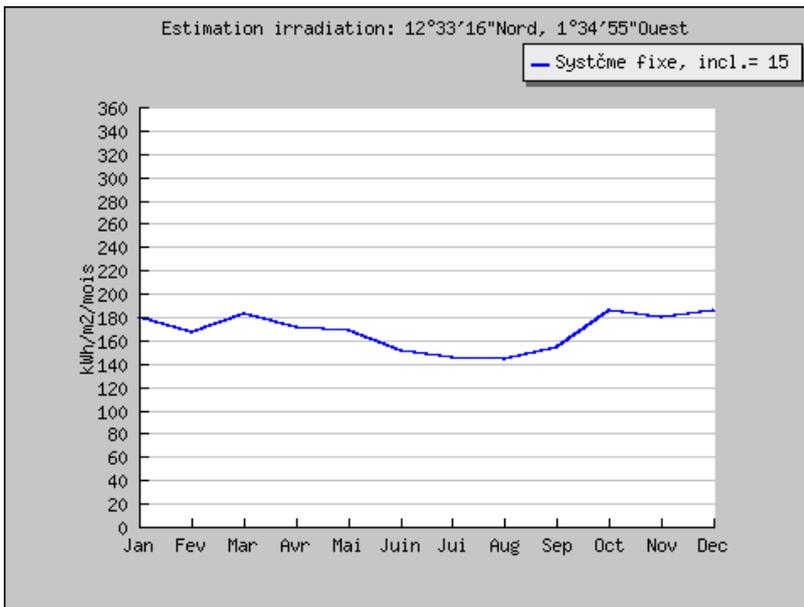
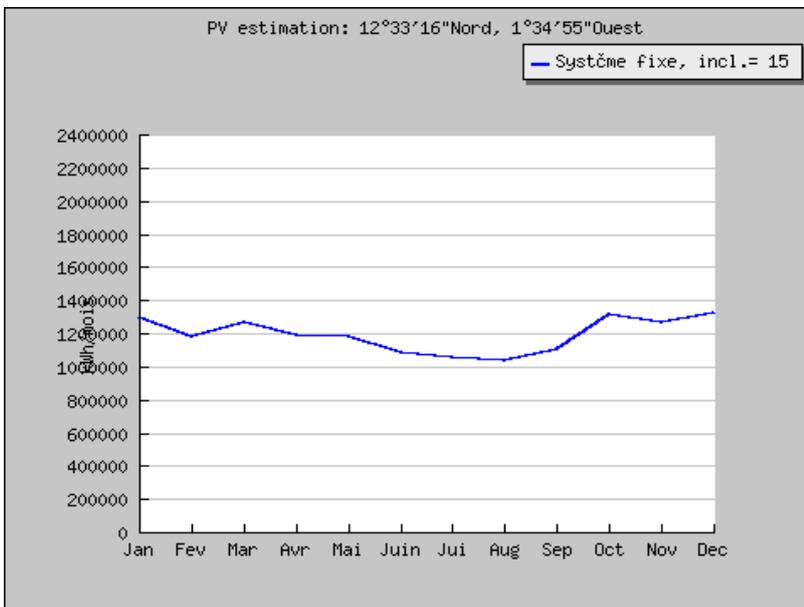
<b>Système fixe: inclinaison=15°, orientation=0°</b>				
<b>Mois</b>	$E_d$	$E_m$	$H_d$	$H_m$
Jan	41700.00	1290000	5.78	179
Fev	42200.00	1180000	5.97	167
Mar	40800.00	1270000	5.88	182
Avr	39600.00	1190000	5.71	171
Mai	38200.00	1180000	5.45	169
Juin	36000.00	1080000	5.06	152
Jui	33900.00	1050000	4.71	146
Aug	33400.00	1040000	4.64	144
Sep	37000.00	1110000	5.15	155
Oct	42400.00	1320000	5.99	186
Nov	42300.00	1270000	5.98	180
Dec	42700.00	1320000	5.97	185
<b>Moyenne annuelle</b>	<b>39200</b>	<b>1190000</b>	<b>5.52</b>	<b>168</b>
<b>Total pour l'année</b>		<b>14300000</b>		<b>2020</b>

$E_d$ : Production d'électricité journalière moyenne par le système défini (kWh)

$E_m$ : Production d'électricité mensuelle moyenne par le système défini (kWh)

$H_d$ : Moyenne journalière de la somme de l'irradiation globale par mètre carré reçue par les modules du système défini (kWh/m<sup>2</sup>)

$H_m$ : Somme moyenne de l'irradiation globale par mètre carré reçue par les modules du système défini (kWh/m<sup>2</sup>)



### Annexe 7 : Le parc de production thermique des principales centrales de la SONABEL

	Groupes				Puissance		Date de mise en Sce
	N°	Type	Vitesse ( t/mn )	Fabricant	Nominale ( kVA )	Exploitation ( kW )	
OUAGA I	1	VASA L9R32R	750	WARTSILA	3 375	2 500	1991
	2	VASA L9R32R	750	WARTSILA	3 375	2 500	1991
	3	18 V W200	1 500	WARTSILA	0	0	2003
	4	18 V W200	1 500	WARTSILA	3 750	3 000	2003
					<b>10 500</b>	<b>8 000</b>	
OUAGA II	1	AGO G V16	1 000	SACM	0	0	1975
	2	12PC 2,5 V400	500	SEMT PIELSTICK	6 600	4 000	1980
	3	12PC 2,5 V400	500	SEMT PIELSTICK	6 600	4 000	1978
	4	12PC 2,5 V400	500	SEMT PIELSTICK	6 600	4 000	1979
	5	18PC 2,5 V400	500	SEMT PIELSTICK	9 990	6 000	1982
	6	18PC 2,5 V400	500	SEMT PIELSTICK	9 990	6 000	1982
	7	12PA6 V280	1 000	DEUTZ - MWM	0	0	1999
	8	12PA6 V280	1 000	DEUTZ - MWM	4 080	2 500	1999
	9	12PA6 V280	1 000	DEUTZ - MWM	4 080	2 500	1999
				<b>47 940</b>	<b>29 000</b>		
KOSSODO	1	18V28/32-H	750	MAN-BW	4 750	3 500	2000
	2	BVM640	600	DEUTZ - MWM	8 075	6 000	2000
	3	BVM640	600	DEUTZ - MWM	8 075	6 000	2000
	4	BVM640	600	DEUTZ - MWM	8 075	6 000	2003
	5	BVM640	600	DEUTZ - MWM	8 075	6 000	2004
	6	18 V W32	750	WARTSILA	10 040	7 000	2005
	7	18 V W32	750	WARTSILA	10 040	7 000	2005
	8	18 V 48/60B	500	MAN-BW	22 987	18 000	2006
				<b>80 117</b>	<b>59 500</b>		
KOMSILGA	1	18V48/60B	500	MAN&BW	22 987	18 000	2013
	2	16 V CM 43	500	Caterpillar	15 660	12875	2012
	3	16 V CM 43	500	Caterpillar	15 660	12875	2012
	4	16 V CM 43	500	Caterpillar	15 660	12875	2012
BOBO I	1	AGO G V12	1 000	SACM	1 375	800	1974
	2	AGO G V16	1 000	SACM	1 875	1 000	1977
	3	AGO G V16	1 000	SACM	1 875	1 000	1976

	4	AGO G V16	1 000	SACM	1 875	1 000	1977
					<b>7 000</b>	<b>3 800</b>	
<b>BOBO II</b>	1	18V28/32	750	MAN-BW	4 750	3 500	1988
	2	18V28/32	750	MAN-BW	4 750	3 000	1990
	3	18V28/32-H	750	MAN-BW	4 750	3 500	1995
	4	18V28/32-H	750	MAN-BW	4 750	3 500	1995
	5	18V28/32-H	750	MAN-BW	4 750	3 500	1998
					<b>23 750</b>	<b>17 000</b>	
<b>PUISSANCE TOTALE ( kVA )</b>					<b>169 307</b>	<b>117 300</b>	

 groupes déclassés

 Groupe en cours d'installation