Lab.RII

UNIVERSITÉ DU LITTORAL CÔTE D'OPALE
Laboratoire de Recherche sur l'Industrie et l'Innovation

CAHIERS DU LAB.RII
– DOCUMENTS DE TRAVAIL –

N°287 **Janvier 2015**

DEVELOPPEMENT DE L'ENERGIE SOLAIRE DANS LES ZONES RURALES DU SENEGAL

Mamadou KEBE

DEVELOPPEMENT DE L'ENERGIE SOLAIRE DANS LES ZONES RURALES DU SENEGAL

DEVELOPMENT OF SOLAR ENERGY IN RURAL AREAS OF SENEGAL

Mamadou KEBE[1]

Résumé : Le Sénégal, pays le plus à l'Ouest du continent africain, reste sous la menace de la sécheresse au Nord, ainsi que de l'érosion côtière et de la dégradation des ressources naturelles. Nos investigations du système énergétique sénégalais nous ont permis d'identifier des vulnérabilités persistantes au plan environnemental, économique, technique et social. Le système énergétique est marqué par une forte dépendance de la biomasse et des produits pétroliers importés, à cela s'ajoute l'absence de technologies efficientes et la faible densité du maillage du réseau de distribution. Malgré la Lettre de politique du secteur de l'énergie qui met l'accent sur une régulation accrue et le recours aux énergies nouvelles et efficaces, on note l'absence d'un cadre réglementaire pour toutes les formes d'énergie disponible et la faiblesse des structures financières d'accompagnement de la politique énergétique.

Abstract: Senegal, the country that located in the farthest west in the African continent remains under the threat of drought in the north, as well as the coastal erosion and the degradation of natural resources. Our investigations of the Senegalese energy system allowed us to identify persistent vulnerabilities to environmental, economic, technical and social. The energy system is characterized by a strong dependence on biomass and imported petroleum products, combined with the lack of efficient technologies and the low density of the distribution network of the mesh. Despite the Letter of energy sector policy that emphasizes an increased regulation and the use of new and efficient energy, there is still the absence of a regulatory framework for all forms of energy available and weakness financial structures accompanying energy policy.

© Laboratoire de Recherche sur l'Industrie et l'Innovation
Université du Littoral Côte d'Opale, janvier 2015

[1] MASTER 2 : Ingénie numérique, signal, image et informatique industrielle, ULCO

DEVELOPPEMENT DE L'ENERGIE SOLAIRE DANS LES ZONES RURALES DU SENEGAL

DEVELOPMENT OF SOLAR ENERGY IN RURAL AREAS OF SENEGAL

Mamadou KEBE

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION **4**

1. LES ENERGIES RENOUVELABLES AU SENEGAL ET LA PLACE DU SOLAIRE **4**
1.1. La biomasse **5**
1.1.1. La diversité de la bioénergie **5**
1.1.2. L'importance de la biomasse **5**
1.1.3. La biomasse au Sénégal **6**
1.2. L'énergie hydraulique **7**
1.2.1. Les bases de la puissance hydraulique **7**
1.2.2. Perspectives pour l'énergie hydraulique au Sénégal **8**
1.3. L'énergie éolienne **9**
1.3.1. Les bases de la puissance éolienne **9**
1.3.2. L'énergie éolienne au Sénégal **11**
1.4. L'énergie solaire **11**
1.4.1. Historique **12**
1.4.3. Le potentiel solaire au Sénégal **12**
1.4.4. Les systèmes de pompage **14**
1.4.5. Approvisionnement des villages en électricité **15**
1.4.6. Les fours solaires **16**
1.2. Bilan énergétique **16**
1.2.1. Approvisionnement **16**
1.2.2. Transformation **17**
1.2.3. Consommation **18**
1.2.4. Analyse des Résultats sur l'Électricité **18**

2. LES PROMESSES DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES (CHOIX DU SOLAIRE) **19**
2.1. Du pétrole à l'électricité solaire **19**
2.2. Du charbon de bois à la cuisine solaire **20**
2.3. De la centrale électrique aux panneaux photovoltaïques **21**
2.4. Financement, Coût et Maintenance **21**
2.4.1. Financement **21**
2.4.2. Les obligations de l'exploitant **21**
2.4.3. Le rôle de l'exploitant au quotidien **22**
2.5. Coût **23**
2.6. La Maintenance **23**
2.6.1. La rentabilité pour l'exploitant **23**
2.6.2. La rentabilité visée **23**
2.7. Avantage et Limites **24**
2.7.1. Avantages **24**
2.7.2. Inconvénients et Limites **24**

CONCLUSION **24**

BIBLIOGRAPHIE ET ABREVIATIONS **24**
9

INTRODUCTION

Loin d'être un luxe, l'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus indispensable pour assurer le développement d'un pays. Le développement a besoin de cette énergie pour atteindre son épanouissement. Toute interruption ou perturbation de l'énergie électrique peut entrainer des conséquences énormes sur tous les plans. Certaines activités ne peuvent pas se passer du tout de cette énergie même pour une minute ; c'est le cas des activités hospitalières. L'absence de l'électricité dans les hôpitaux peut entrainer des pertes de vie humaines.

Aujourd'hui on notera que pour des besoins énergétiques de plus en plus importants de la société face à des moyens limités, des solutions alternatives sont à trouver pour compenser l'insuffisance des modes de production d'énergie électrique traditionnels. Les énergies renouvelables sont une de ces solutions. Dans cette grande filière des énergies renouvelables nous avons le sous-secteur de l'énergie solaire. Le problème de ce sous secteur est l'étroitesse du diapason de puissance et surtout son coup élevé dans une durée courte.

Dans ce travail, nous allons détailler et démontrer le développement des énergies solaires dans la zone rurale du Sénégal. Dans le premier chapitre, nous présentons Les énergies renouvelables au Sénégal et place du solaire ainsi que Les énergies renouvelables prometteuses pour l'économie aux Sénégal. Nous citons aussi dans ce chapitre les Bilan énergétiques aux Sénégal et dans le monde. Dans le deuxième chapitre, nous analysons les promesses du panneau photovoltaïque et ses Avantages et difficultés de l'utilisation dans les zones rurale.

1. LES ENERGIES RENOUVELABLES AU SENEGAL ET LA PLACE DU SOLAIRE

Par définition, les énergies dites renouvelables sont potentiellement inépuisables. La nature peut les reconstituer assez rapidement, contrairement au gaz, au charbon et au pétrole, dont les réserves, constituées après des millions d'années, sont limitées. Les énergies solaire, éolienne, hydraulique et géothermique en sont les formes les plus courantes.

Au Sénégal, les énergies solaires, éolienne, hydraulique et de biomasse sont le plus facilement exploitables. L'énergie lumineuse du Soleil peut être convertie en électricité, on peut exploiter la force du vent et de l'eau en mouvement pour faire tourner des turbines électriques; des céréales telles que le maïs et le blé peuvent produire de l'éthanol, un combustible que l'on peut utiliser pour alimenter les automobiles.

L'énergie solaire représente le meilleur compromis entre le coût de production, qui assure la viabilité économique et les impacts sur l'émission des gaz à effet de serre. Ceci explique le très fort taux de croissance de cette filière énergétique partout dans le monde. Au Sénégal, cette croissance est exponentielle depuis 2000, suite à l'instauration au mois de mai, d'un programme d'encouragement à la production d'énergie solaire. La forme prédominante est l'énergie solaire. Elle est plus importante que toutes les autres et inépuisable tant que le Soleil brillera (des estimations projettent 4,9 millions d'années !!!).

Dans le contexte de ce document, toutes les formes d'énergie renouvelable seront traitées très brièvement sauf l'énergie solaire qui est la basse de notre étude.

1.1. La biomasse

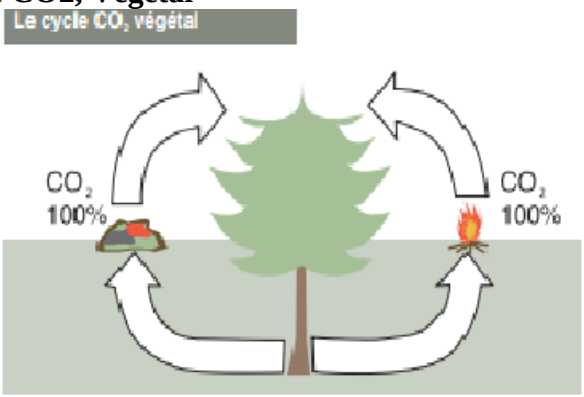
1.1.1. La diversité de la bioénergie

Tous les êtres vivants sont constitués de molécules contenant du carbone : glucides, protéines et lipides. Le cycle du carbone intègre toutes les réactions permettant aux êtres vivants d'utiliser le carbone pour fabriquer leurs tissus et libérer de l'énergie. Les végétaux représentent le point de départ du cycle du carbone. Grâce à la photosynthèse, les plantes absorbent le carbone de l'air (CO2) et l'intègrent à leur propre biomasse (feuilles, bois, racines, fleurs et fruits). Cette matière organique sert de nourriture aux organismes hétérotrophes (consommateurs). En libérant de l'énergie, la respiration des hétérotrophes et des autotrophes renvoie du carbone dans l'atmosphère (CO2).

Une forêt en croissance constitue un puits de carbone, c'est-à-dire qu'elle fixe (ou accumule) plus de carbone par la photosynthèse qu'elle n'en libère par la respiration. Lorsque la forêt atteint sa maturité, l'équilibre se crée entre la quantité de carbone fixé et la quantité de carbone libéré. La forêt contient évidemment du carbone dans ses arbres.

Grâce à la photosynthèse, les plantes peuvent créer de la biomasse et stocker ainsi de l'énergie. L'utilisation énergétique de la biomasse, c'est-à-dire du bois, des déchets biologiques, du lisier et d'autres substances d'origine animale ou végétale, représente un potentiel important pour la production de chaleur et d'électricité, ainsi que pour la production de carburant.

Figure 1 : Cycle CO2, Végétal



Source : PERACOD

1.1.2. L'importance de la biomasse

La biomasse ou plus précisément la biomasse traditionnelle est essentielle à l'égard de la demande énergétique locale dans de nombreuses régions du monde en développement. La biomasse est la première source d'énergie pour plus de 2,4 milliards de personnes dans les pays en développement. Dans la majorité des régions du monde, elle est facilement disponible auprès de la plupart des personnes en situation de pauvreté et fournit une énergie vitale à un coût abordable pour la cuisson et le chauffage. Les industries basées sur la biomasse sont une source significative pour le développement de l'entreprise, la création d'emplois et sont une source de revenus dans les régions rurales. L'énergie biomasse moderne, au contraire est largement utilisée

dans de nombreux pays industrialisés ainsi que dans certaines parties du monde en développement. Dans les zones à climat favorable et avec une gestion propre en adéquation avec des pratiques écologiques appropriées, la biomasse moderne peut être une source durable d'électricité aussi bien que les combustibles liquides et gazeux. La biomasse par conséquent n'est pas seulement une source énergétique vitale pour beaucoup aujourd'hui, mais est probablement en voie de devenir une source énergétique importante dans le futur, à condition que des mesures appropriées soient adoptées pour une exploitation durable. Un certain nombre de faits parmi les suivants ont été constatés et ont suscité un intérêt croissant dans l'énergie biomasse :

• Elle contribue à la réduction de la pauvreté dans les pays en développement ;
• Elle répond aux besoins énergétiques en permanence, sans transformation onéreuse des installations.
• Elle peut être stockée et elle est disponible de manière flexible.
• Elle peut fournir de l'énergie sous toute forme selon les besoins des personnes (combustibles liquides et gazeux, chaleur et électricité).
• Elle peut améliorer l'élimination des déchets au niveau des communes et fournit en même temps de l'énergie.
• Elle est pauvre en dioxyde de carbone.
• Elle peut aider à rendre les terres jusqu'alors improductives et dégradées, cultivables en augmentant la biodiversité, la fertilité du sol et la rétention d'eau. Des statistiques disponibles indiquent que le taux de biomasse dans la consommation énergétique mondiale est resté à peu près stable ces 30 dernières années.

En Afrique subsaharienne, environ 50 % de toute l'énergie primaire provient de la biomasse, au Sénégal sa part se chiffre à 47 %. La biomasse est la première source d'énergie pour plus de 9 million des Sénégalais.

1.1.3. La biomasse au Sénégal

Le Sénégal est doté d'un climat tropical sec caractérisé par des températures modérées sur la côte qui s'élèvent au fur et à mesure que l'on s'en éloigne. Du nord au sud, quatre zones se distinguent :

• Une zone aride ou semi désertique avec des précipitations annuelles ne dépassant pas 350 mm.
• Une zone semi-aride, de type continental sec, comprise entre les isohyètes 350 et 700 mm.
• Une zone subhumide, moins chaude et moins sèche que la précédente, caractérisée par une pluviométrie annuelle oscillant entre 700 et 900 mm.
• Une zone humide caractérisée par d'importantes précipitations de l'ordre de 1 000 à 1 200 mm.

La répartition des ressources Sylvio-génétiques est conditionnée principalement par le gradient climatique. On distingue six zones éco géographiques correspondant à différents types de formations végétales.

Figure 2 : Zones éco géographiques su Sénégal

1.2. L'énergie hydraulique

1.2.1. Les bases de la puissance hydraulique

De l'eau en altitude possède une énergie potentielle de pesanteur. Avant l'avènement de l'électricité, les moulins à eau permettaient déjà une exploitation de cette énergie mécanique pour faire marcher des machines-outils. Avec l'avènement de l'électricité, on a pu transformer cette énergie mécanique en énergie électrique.

La grande sécurité d'exploitation et d'approvisionnement et les frais de combustible échus à long terme offrent une possibilité avantageuse d'assurer un approvisionnement de base en électricité. En raison du fait que les centrales hydrauliques, en fonction de leur type, disposent d'une capacité de stockage d'énergie et réagissent vite en cas de besoin en mettant de l'électricité à disposition, elles jouent un rôle essentiel dans la stabilité du réseau. Ces centrales hydrauliques réduisent la dépendance et les risques encourus dans le cadre des importations d'énergie et sont à la base du développement économique de régions qui ne disposent pas d'un approvisionnement énergétique couvrant l'ensemble de leur territoire.

Aujourd'hui, la capacité hydraulique mondiale est estimée à 950 GW desquels seulement 85 GW vont à l'hydraulique de petite échelle 73 avec moins de 10 MW en puissance installée, la grande majorité étant des grandes centrales hydrauliques. Les grandes centrales hydrauliques ont une puissance supérieure à 10 MW, les petites centrales de 5 MW à 10 MW. On parle de microcentrales pour une puissance de 100 kW à 5 MW et de pico centrale pour les puissances de moins de 100 kW 74. Ces sites de production à petite échelle peuvent alimenter des sites isolés (une ou deux habitations, un atelier d'artisan, des exploitations agricoles…) ou produire de l'électricité vendue à plus petite échelle.

Généralement, les grandes centrales hydrauliques avec une capacité installée de plus de 10 MW ne rentrent pas dans l'appellation 'les nouvelles renouvelables à cause de l'impact critique des grands barrages au regard de l'environnement et des questions sociales puisqu'elles causent souvent le déplacement de larges franges de la population.

1.2.2. Perspectives pour l'énergie hydraulique au Sénégal

Le Sénégal obtient de l'électricité venant de l'énergie hydraulique à partir de la centrale de **Manantali** au Mali commun aux pays membres de l'OMVS (Mali, Mauritanie, Sénégal) qui a été mise en service en 2002. Le barrage hydroélectrique de **Manantali** a été construit sur le Bafing dans la région de Kayes. D'une capacité installée de 200 MW, la production électrique est répartie entre le Sénégal (33 %), la Mauritanie (15 %) et le Mali (52 %). L'énergie nette enlevée par SENELEC est en baisse depuis quelques années et la baisse du niveau du lac a induit un productible très faible.

D'après l'OMVS, près d'une dizaine de sites de barrages présentant un potentiel hydroélectrique évalué à plus de 4 000 GWh/an ont été identifiés au cours du fleuve Sénégal et ses affluents. Toutefois, à ce jour, il n'existe que le barrage de **Manantali** et cette construction a montré une fois de plus que des installations hydroélectriques de cette taille sont en général accompagnées de problèmes écologiques.

On constate que, malgré la forte demande en énergie électrique qui existe et le coût peu élevé du kWh issu de l'hydroélectricité 75, la puissance hydroélectrique installée reste faible. Cette situation peut se justifier par :

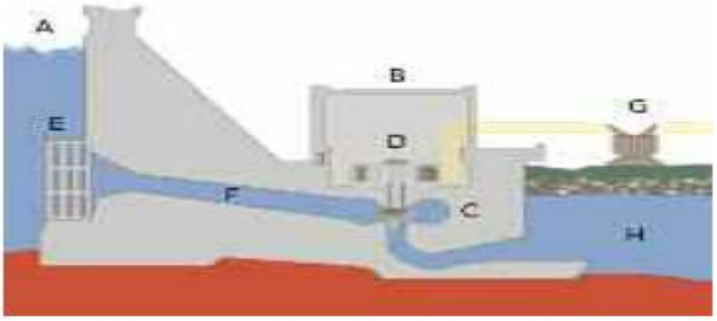
• Le coût élevé des investissements requis pour la construction d'une centrale hydroélectrique et les lignes de transports subséquents.

• L'éloignement des centres de consommation par rapport aux sites présentant un potentiel adéquat, ce qui contribue à renchérir encore davantage les coûts de transport de l'énergie.

• Les impacts négatifs sur l'environnement liés à l'implantation des centrales nécessitant des mesures de protection environnementale souvent coûteuses et qui participent à augmenter le coût du projet. Par rapport au territoire national du Sénégal seul sans prendre en compte les pays voisins, des études réalisées au milieu des années 80 ont montré que les ressources hydroélectriques sont peu importantes. S'agissant de la pico hydraulique (puissance inférieure à 100 kW) pour lequel le Sénégal ne compte aucune réalisation, il n'existe pas encore d'études ayant pour objet de déterminer son potentiel. Compte tenu du relief relativement plat du Sénégal, on peut présumer qu'à l'exception de la région de Kédougou, les ressources dans ce domaine ne devraient pas être significatives.

Toutefois, il serait souhaitable de préciser davantage le potentiel de cette filière puisqu'elle présente de nombreux avantages : les répercussions environnementales des mini-centrales hydroélectriques sont très faibles, les investissements pas très élevés, et on n'a besoin ni de grandes lignes de transport ni de grands centres de transformation. Enfin, les coûts d'installation et de maintenance sont bas et la matière première est gratuite.

Figure 3 : centrale à barrage



Légende : A - réservoir, B - centrale, C - turbine, D - générateur, E - prélèvement, F - conduite, G – réseau électrique, H - rivière

Source : Tomia / GNU Free Documentation License

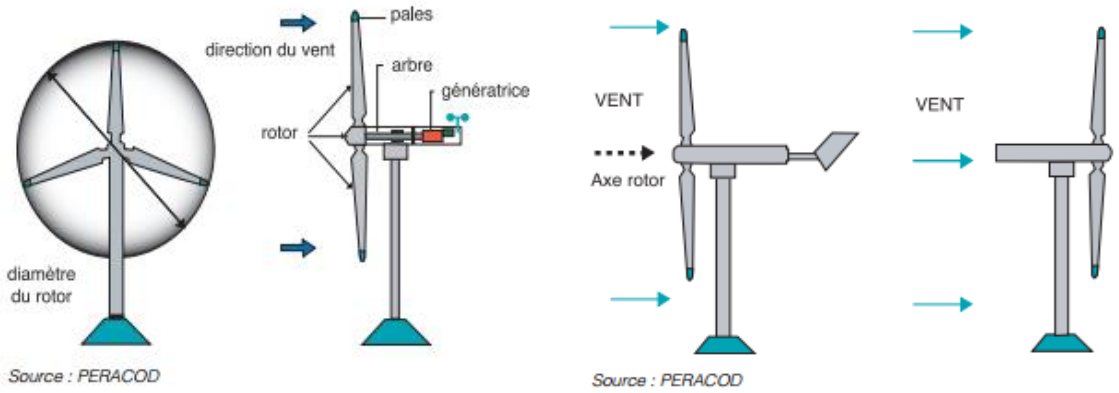
1.3. L'énergie éolienne

1.3.1. Les bases de la puissance éolienne

Le vent souffle autour de la Terre grâce au Soleil. Comme la Terre tourne, le Soleil réchauffe différentes parties de notre planète de façon inégale, de manière plus importante au niveau de l'équateur. Cet air réchauffé, donc plus léger, va s'élever puis se diriger vers des zones plus froides, les pôles. L'air ainsi refroidi aura tendance à se rediriger vers l'équateur.

À ces phénomènes de montées et descentes d'air pôles/équateur, s'ajoutent des déplacements d'air latéraux engendrés par la rotation de la Terre. Ces mouvements d'air produisent les vents. L'énergie cinétique contenue dans ces déplacements de masses d'air est appelée énergie éolienne.

Figure 4 : Schéma de fonctionnement d'un éolien



1.3.2. L'énergie éolienne au Sénégal

À l'instar de l'évolution mondiale, l'énergie éolienne gagne de l'importance au Sénégal, pour l'instant surtout au niveau de petites installations isolées dans le domaine de l'électrification rurale mais parallèlement un projet d'installation d'un parc éolien de taille importante sur la

Grande Côte commence à prendre forme. Une autre étape importante dans l'évolution de l'éolien au Sénégal a été l'inauguration d'une première mini centrale hybride éolien-solaire-Diesel pour l'installation d'un réseau en îlotage au niveau village au printemps 2010. En général on peut distinguer deux périodes de vents au Sénégal :

• Une période de vent "fort" qui correspond aux alizés et allant de décembre à mai. Durant cette période, la vitesse moyenne du vent est comprise entre 5,1 m/s et 5,6 m/s.

• Une période de vent "faible" durant la saison des pluies (hivernage) allant de juin à novembre avec une vitesse de vent comprise entre 3,3 m/s et 4,2 m/s.

Les vents dominants sont l'Harmattan au nord-est et l'alizé maritime au nord-ouest.

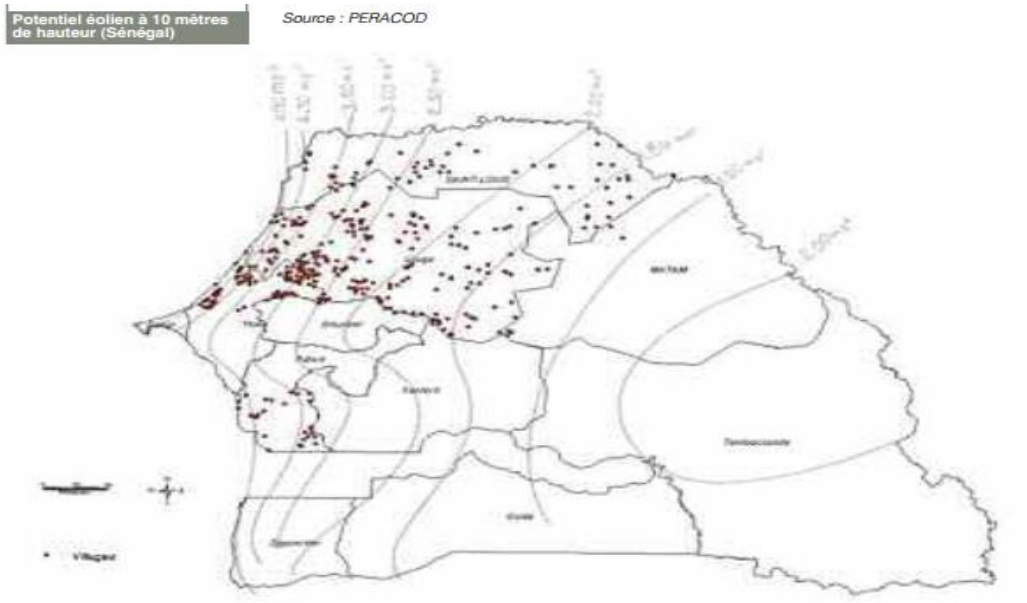
Les données disponibles au Sénégal ont toujours souligné la faiblesse relative des vents dans le pays, à l'exception de l'axe Dakar – Saint-Louis.

En 2003, le gouvernement du Sénégal avait initié, ensemble avec la GIZ, le projet TERNA Sénégal dans le but de concevoir un parc éolien d'une capacité installée de 10 MW sur la Grande Côte qui devra être raccordé au réseau. Ainsi TERNA (Technical Expertise for Renewable Energy Application) Sénégal a effectué des mesures de vents durant un an de juillet 2010 à août 2013 à **Kayar** et à **Potou.** Les données obtenues ont montré que les vitesses de vent sont supérieures à **Potou** et ont donné les résultats suivants : La moyenne annuelle à ce site s'élève à 6,4 m/s à une hauteur de 70 m par contraste à Kayar avec une moyenne annuelle de 5,8 m/s.

Les calculs initiaux estimaient les coûts de production autour de 53 Francs CFA par kWh à **Potou** et de 66 Francs (0.5 euro) CFA à Kayar70 (0.52 euro). Il a été décidé de procéder à l'élaboration d'une étude détaillée de développement d'un parc éolien et l'élaboration d'un cahier de charges devant conduire à une appel d'offres pour la production d'électricité à partir de l'énergie éolienne à **Potou**.

L'étude de faisabilité 71 pour un parc éolien d'une puissance électrique nominale de 50 MW au site de Potou a été finalisée au printemps 2010. Cette étude pronostique un rendement énergétique d'environ 95 GWh annuel. Les coûts de la production énergétique (tarif requis) ont été calculés de manière détaillée et pour quatre options différentes (selon les éoliennes prévues et avec ou sans subvention du Ministère fédéral allemand de la Coopération économique et du développement). Les calculs finaux se situent dans une fourchette de 65,596 et 85,93 (0.8 euro) Francs CFA. Un autre site potentiel de parc éolien se trouve à **Saint-Louis**. La faisabilité de ce parc fait également objet d'une étude en ce moment.

Figure 5 : la carte d'évolution du vent au Sénégal



1.4. L'énergie solaire

L'objet de notre étude est basé sur ce système d'énergie, qui constitue une forte croissance dans les zones rurales.

Pour nous allons repartir nos études en 3 parties :

- Historique des panneaux solaires
- Les bases de l'énergie solaire (fonctionnement).
- Le potentiel solaire au Sénégal et sa place qui pourra occuper

1.4.1. Historique

L'utilisation de l'énergie solaire remonte à l'Antiquité. Les Grecs allumaient en effet la flamme olympique grâce à un système de miroirs avec les rayons du Soleil. Le Français Salomon de Caus construit en 1615 une pompe solaire, grâce à l'utilisation d'air chauffé par le rayonnement solaire. En 1747, **Georges-Louis de Buffon** expérimente un miroir qui concentre la lumière du soleil en un seul point focal. Il arrive à faire fondre un morceau d'argent (la température de fusion de l'argent est de 1 044 °C).

À la fin du 18e siècle, grâce à une lentille à liquide qui concentre les rayons solaires, Antoine Lavoisier construit un four solaire qui atteint la température de 1 800 °C. Dans les années 1780, H. B. de Saussure invente un instrument de mesure lui permettant d'étudier les effets calorifiques des rayons du soleil qu'il nomme « hélio thermomètre » ; cet instrument utilise l'effet de serre obtenu par un vitrage placé au-dessus d'un absorbeur dans un caisson isolé, il crée ainsi un capteur solaire thermique à basse température.

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, est découverte par **Edmond Becquerel** en 18393, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

En 1875, **Werner von** Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

En 1913, **William Coblentz** dépose le premier brevet pour une cellule solaire qui malheureusement ne pourra jamais fonctionner. En 1916, **Robert Millikan** sera le premier à produire de l'électricité avec une cellule solaire, mais pendant les quarante années suivantes, personne ne fera beaucoup de progrès en énergie solaire car les cellules photovoltaïques ont un trop mauvais rendement pour transformer la lumière du soleil en énergie. Le phénomène reste encore une découverte anecdotique.

Pendant les années 1970 et 1980, des efforts sont faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. L'énergie solaire connaîtra un second élan au cours du premier choc pétrolier dans les années 1970. Alors que le prix du pétrole augmente de façon spectaculaire, les panneaux solaires photovoltaïques commencent à être utilisés pour la première fois dans les maisons. En effet, en 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à **l'université du Delaware** et en 1983, la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie. Depuis les panneaux solaires se sont développés lentement. Pendant longtemps, ils ont été considérés comme des sources d'énergies alternatives. L'énergie solaire est de nouveau en plein essor car on prévoit une pénurie de pétrole prochaine, on se préoccupe du réchauffement de la planète et les prix de l'énergie n'ont jamais été aussi hauts. En effet, en 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

1.4.2. Les bases de l'énergie solaire

Le Soleil est à l'origine de nombreuses énergies renouvelables. Ainsi peut-on considérer l'énergie solaire comme une ressource énergétique renouvelable fondamentale dans le monde. Il y a cependant différentes sortes d'énergie solaire:

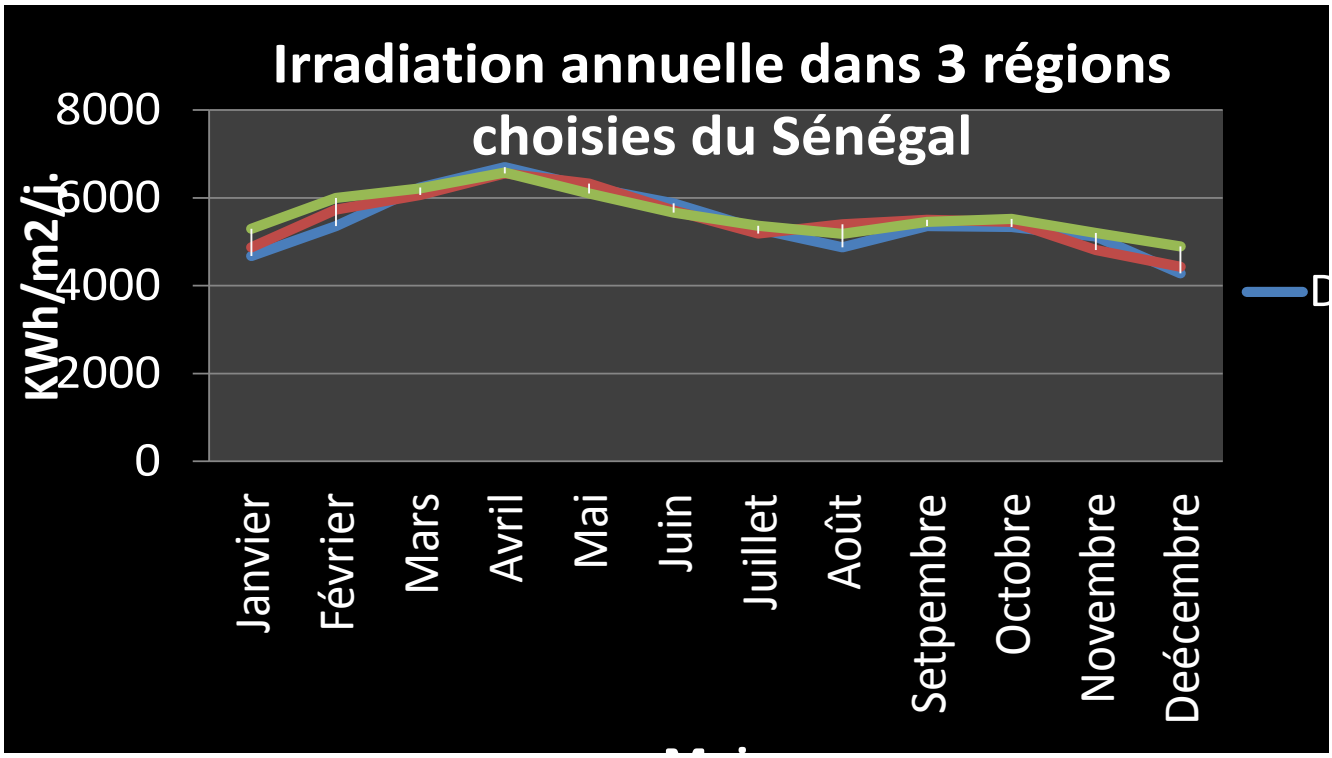
- L'énergie solaire historique 59 : les combustibles fossiles (non renouvelables !)
- La conversion directe de l'énergie solaire en électricité : le photovoltaïque
- La conversion directe de l'énergie solaire en chaleur
- Le solaire thermique
- L'énergie solaire indirecte par la photosynthèse : la biomasse.

Dans cette section, nous allons nous préoccuper seulement des formes dites 'classiques' de l'énergie solaire, c'est-à-dire le solaire thermique et le solaire électrique (photovoltaïque).

1.4.3. Le potentiel solaire au Sénégal

Le Sénégal a un important potentiel solaire avec une durée annuelle moyenne d'ensoleillement de l'ordre de 3 000 heures et une irradiation moyenne de 5,7 KWh/m2/j. Cette irradiation varie entre la partie nord plus ensoleillée (5,8 KWh/m2/j à Dakar) et la partie sud plus riche en précipitations (4,3 KWh/m2/j à Ziguinchor).

Figure 6 : Irradiation annuelle dans 3 (Dakar TMBA et Kaolack) régions choisies du Sénégal

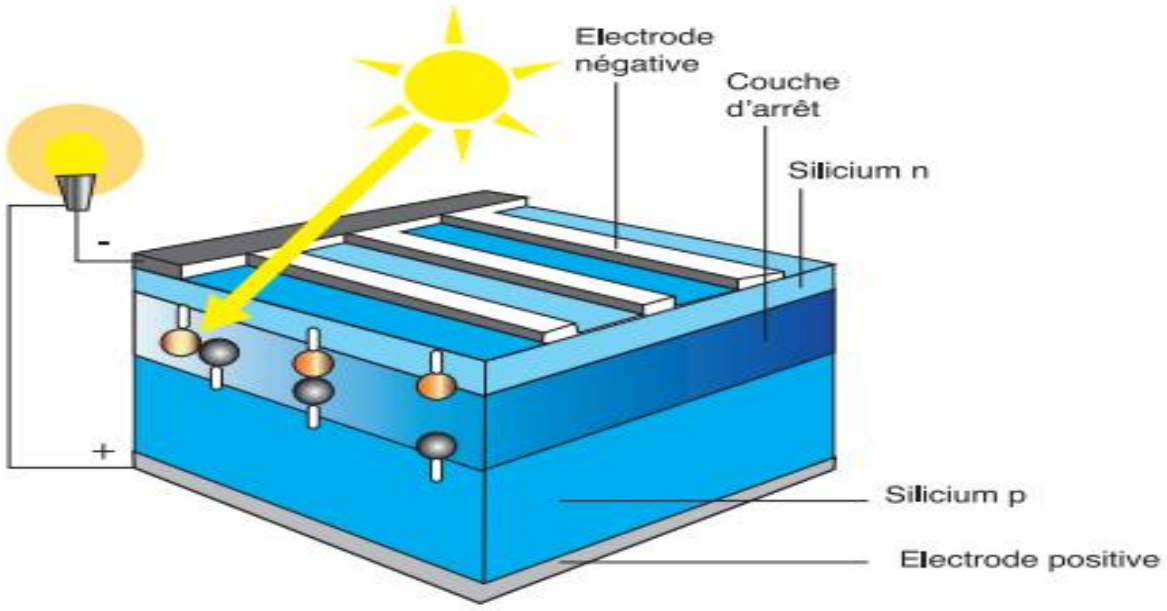


Technologie et applications : L'effet photoélectrique convertit directement l'énergie du Soleil en énergie électrique. Cet effet est connu depuis bien longtemps des semi-conducteurs matériaux pour transistors et puces. Ce n'est que dans les années 70, alors que la matière première devenait moins chère, qu'on a développé des appareils énergétiques photovoltaïques pour les vaisseaux spatiaux et pour les besoins énergétiques moins importants comme les calculatrices électroniques, les montres, etc.

Dans un module photovoltaïque, la charge est connectée entre deux couches de contact électrique, l'une à l'arrière du panneau et l'autre au-dessus. L'énergie produite par les rayonnements est séparée en charges positives et négatives, qui peuvent être utilisées aux deux pôles des cellules comme une batterie.

Pour obtenir de meilleurs rendements, de nombreuses cellules solaires vont être assemblées et reliées en série. Le dessus du panneau est revêtu d'une couche antireflet afin que la lumière entrant ne soit pas réfléchie mais absorbée par les couches semi-conductrices du panneau. Tous les panneaux photovoltaïques comprennent ces deux sortes de semi-conducteurs, l'une avec des électrons positifs et l'autre avec des électrons positifs et l'autre avec des électrons négatifs. La surface de ces panneaux est polie.

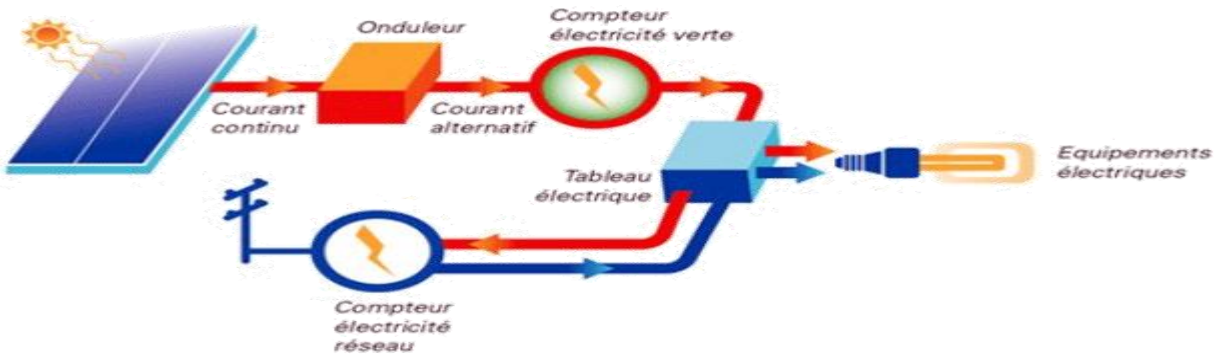
Figure7 : Structure d'un module photovoltaïque



Source : PERACOD

Comme le principe technique d'un transistor, la lumière (photon) entrant sur la structure du semi-conducteur soulève des électrons (libres) à la matière semi-conductrice, créant un courant électrique continu qui va circuler entre les deux couches de contact.

Figure 8 : La conversion photovoltaïque



1.4.4. Les systèmes de pompage

Une application autonome très utile est les systèmes de pompage photovoltaïques ou PPV. Des systèmes photovoltaïques assurent à la fois l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation des surfaces agricoles ou l'abreuvage du bétail dans les régions reculées éloignées du réseau. Dans ce cas, on n'a pas besoin d'accumulateur car l'eau pompée peut être stockée dans un réservoir.

Ces systèmes PPV peuvent être utilisés pour l'irrigation de cultures de rapport ou de pépinières ou bien pour le pompage d'eau potable et constituent souvent une source d'énergie de pompage plus fiable que les groupes moteur / pompe marchant au diesel ou gazole.

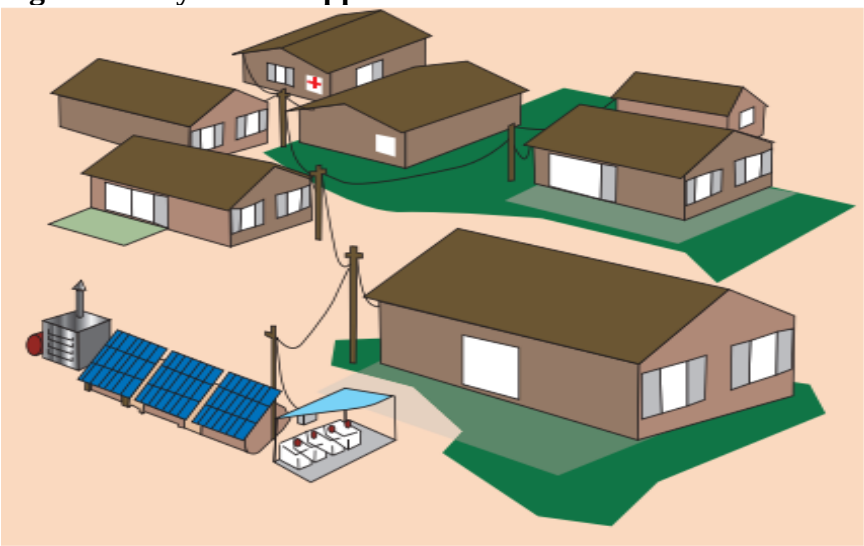
Figure 9 : Système de pompage photovoltaïque au Sénégal

Source : PRS - Projet Régional Solaire

1.4.5. Approvisionnement des villages en électricité

Une autre application autonome du photovoltaïque est son utilisation dans l'électrification rurale. De nombreux villages dans l'ensemble du monde ne sont pas raccordés au réseau d'électricité.
Les petits réseaux décentralisés, appelés mini centrales, peuvent approvisionner en électricité des bâtiments isolés, voire même plusieurs bourgades. Le petit réseau de distribution est alimenté à partir d'un approvisionnement central, d'une mini-centrale, en électricité. Il s'agit souvent de systèmes hybrides utilisant le photovoltaïque, des aérogénérateurs et des générateurs au Diesel alliés à un accumulateur et à un onduleur permettant l'approvisionnement en courant alternatif. Les maisons individuelles, les unités de production et les institutions communales telles que les écoles et les services de santé sont reliées au réseau. Les systèmes sont adaptés au consommateur en puissance et en capacité et peuvent être agrandis et développés si nécessaire.

Figure : 10 Système d'approvisionnement



Source : PERACOD

1.4.6. Les fours solaires

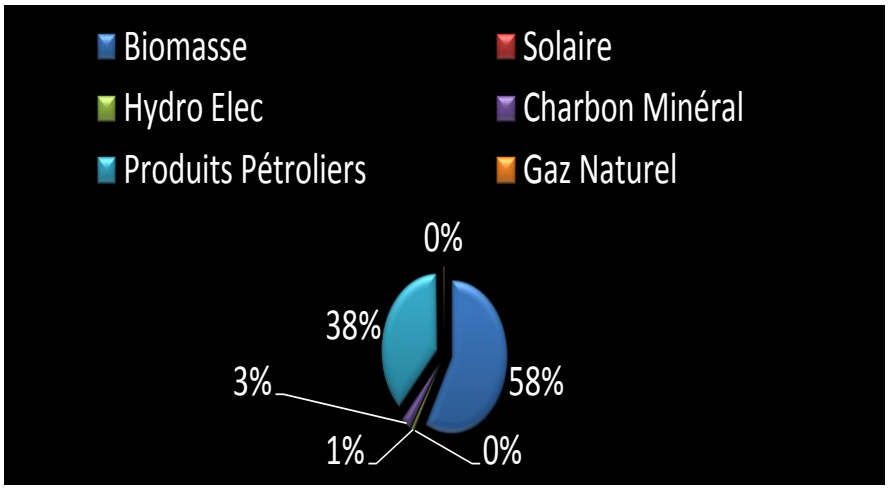
Les fours solaires ont été longtemps propagés comme un remède efficace à la crise (africaine) du bois énergie. Cependant, ils n'ont pas conquis de parts considérables de marché en Afrique malgré les nombreux modèles de projets prometteurs.
Pendant toutes ces années, trois différents types de fours ont été développés à savoir :
• Les fours à caissons ;
• Les fours paraboliques ;
• Les fours à panneaux.
Chacun de ces trois types a des avantages particuliers et correspond à des modes de cuisson et circonstances particulières.

1.2. Bilan énergétique

1.2.1. Approvisionnement

Les approvisionnements en énergie du Sénégal qui s'élèvent à 3780 **ktep** en 2013, sont dominés par la biomasse (54,3%) produite localement, suivie des produits pétroliers (40,6%), pour lesquels le Sénégal dépend essentiellement de l'extérieur, du charbon minéral importé d'Afrique du Sud (4%) utilisé dans les cimenteries, de l'hydroélectricité du barrage de **Manantal**i (0,5%), du Gaz naturel produit localement (0,4%) et du solaire photovoltaïque (0,006%). Les approvisionnements en énergie du Sénégal qui s'élèvent à 3780 **ktep** en 2013. Ils sont essentiellement dominés par la biomasse (54,3%) produite localement, et les produits pétroliers (40,6%), pour lesquels le Sénégal dépend essentiellement de l'extérieur. Le reste est constitué du charbon minéral importé d'Afrique du Sud (4%) utilisé dans les cimenteries, de l'hydroélectricité, produit au niveau du barrage de **Manantali** (0,5%), du Gaz naturel produit localement (0,4%) et du solaire photovoltaïque (0,006%).

Figure 11 : Approvisionnements intérieurs par type d'énergie

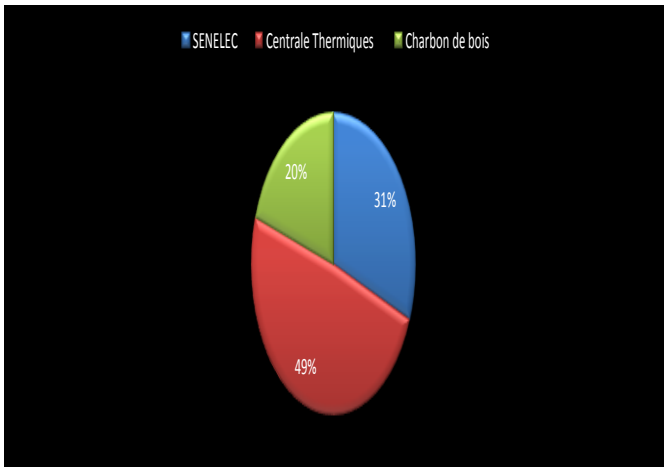


Source : SIE-Sénégal 2014
Ps. Les valeurs inferieurs à zéro sont représentées en fifre zero

1.2.2. Transformation

En 2013, le rendement énergétique global des centrales thermiques de la SENELEC est de l'ordre de 31,8 % soit 2,9 % de moins qu'en 2012. L'électricité est pour l'essentiel produite à partir de centrales thermiques utilisant exclusivement des produits pétroliers, importés. L'offre globale d'électricité est de 2858'3 GWh en 2009 contre 2 701,6 GWh en 2012 (toutes énergies électriques confondues). Par ailleurs, il faut signaler que la part des autoproducteurs (428,3 GWh) est destinée essentiellement à leur autoconsommation. Ils peuvent acheter de l'électricité en cas de déficit de production ou en vendre en cas d'excédent à la **SENELEC**. Le rendement pondéral de la production de charbon de bois est considéré par hypothèse comme égal à 20 %, compte tenu du type de meule de carbonisation utilisé, ce qui a permis d'estimer les consommations finales de charbon de bois**.**

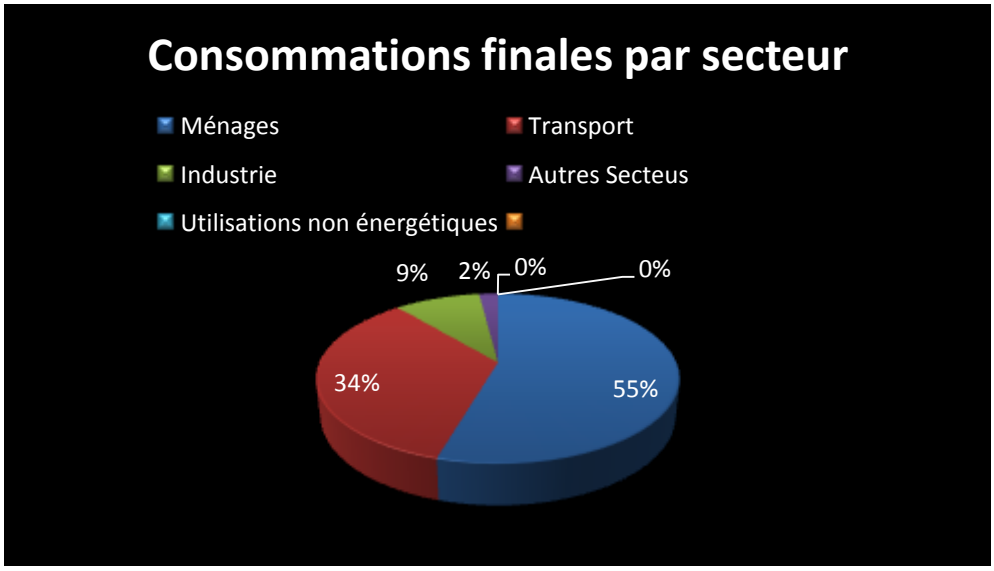
Figure 12 : Transformation



1.2.3. Consommation

La consommation finale totale d'énergie du Sénégal, en 2009, est de 2502,5 ktep contre 2453,3 ktep en 2013, soit un accroissement de 2%.

Figure 13 : Consommations finales totales par type d'énergie



1.2.4. Analyse des Résultats sur l'Électricité

En 2013, la production d'électricité au Sénégal (production publique, autoproduction et production décentralisée) est de 2858 ,3 GWh, dont 2427,1 GWh (Senelec et IPP), soit 84,9 %, sont livrés par SENELEC. La part des autos productrices est de 428,2 GWh (15%) et celle du

solaire photovoltaïque est de 2,968 GWh, soit 0,1% de la production nette. Entre 2000 et 2013, la production d'électricité est passée de 1603 GWh à 2853,3 GWh, soit une progression de 78,2 % sur cette période et de près de 6% en moyenne par an. Cette croissance, supérieure à la croissance moyenne du PIB (4%), se poursuit à un rythme soutenu et devrait encore se maintenir dans le futur. Aujourd'hui, le sous-secteur de l'électricité est confronté à cinq défis majeurs :

• Satisfaire une demande en croissance accélérée, avec un niveau de qualité de service satisfaisant

• Développer l'infrastructure de production, de transport et de distribution, en tenant compte des préoccupations liées à la compétitivité, notamment la stratégie de croissance accélérée (SCA), et à l'accès aux services de bases, décliné dans le Document de Stratégie de Réduction de la Pauvreté (DSRP) et dans les OMD ;

• Maîtriser la demande d'énergie électrique ;

• Renforcer l'efficacité énergétique au niveau de l'offre ;

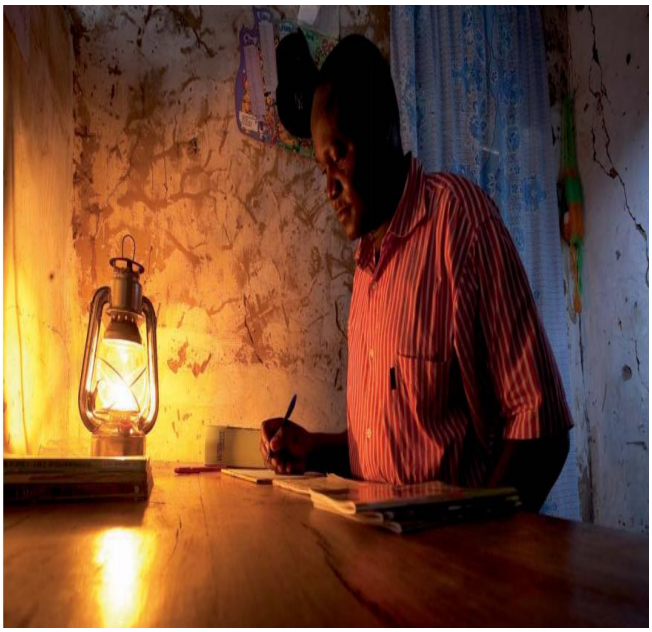
• Ouvrir le marché à des opérateurs indépendants susceptibles de prendre en charge une partie de l'effort de renforcement des capacités électriques au niveau de l'offre, et s'ouvrir à des perspectives d'importer de l'énergie électrique à une échelle régionale, au niveau du West African Power Pool (WAPP). Les quatre premiers défis nécessitent une planification rigoureuse de l'infrastructure électrique afin qu'elle satisfasse quantitativement et qualitativement les besoins de la demande, tout en optant pour des choix énergétiques et technologiques garantissant la compétitivité du système électrique sénégalais, et minimisant l'impact sur l'environnement. Le dernier défi consiste à permettre à des opérateurs indépendants de s'introduire sur le marché, tant au niveau de la production que celui de la distribution, afin de le dynamiser et de favoriser la concurrence et l'amélioration du service.

2. LES PROMESSES DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES (CHOIX DU SOLAIRE)

Dans cette partie nous donnerons quelques exemples d'applications dans une zone rurale

2.1. Du pétrole à l'électricité solaire

Dans ce secteur particulièrement dans les villages le pétrole est la base de la lumière comme le montre l'image ci-dessous. Le système solaire peut remplacer la lampe à pétrole…



2.2. Du charbon de bois à la cuisine solaire

Le bois (ou charbon du bois) est la source d'énergie la plus utilisée pour la cuisson**.** Alors nous pouvons le remplacer par un four solaire

2.3. De la centrale électrique aux panneaux photovoltaïques

Partant de ces images, nous savons que les centrales électriques sont très coûteuses et que l'évolution des prix du pétrole varie, étant donnée les pays en voie développement n'arrivent plus à suivre le rythme ; la centrale solaire est une solution idéale surtout dans les zones rurales.

2.4. Financement, Coût et Maintenance

Choix de l'option technique de moindre coût pour le village de Djiondji situé au Sud-est du Sénégal avec une population de 1500 habitants. Pour cela nous allons faire analyse économique, financière afin de déterminer la rentabilité

2.4.1. Financement

Pour arriver à ce genre de projet comme tous projets l'on fait appel à l'état, la diaspora et la collectivité locale. L'une des missions de la Fondation Énergies pour le Monde est d'accompagner les acteurs de terrain pour qu'ils soient aptes à gérer le projet et ses suites par eux-mêmes. Un acteur-clé parmi ces partenaires locaux est l'exploitant. Les systèmes solaires photovoltaïques installés dans le village sont sous la responsabilité d'un exploitant, qui, entre autres, reçoit les demandes d'inscription des usagers, encaisse leurs adhésions et paiements mensuels, gère le travail de suivi et de maintenance des techniciens. La proximité géographique, fruit de la méthodologie de sélection de la Fondation, facilite le travail de l'exploitant et minimise ses coûts de transport. Le retour d'expérience de cet exploitant sera particulièrement utile pour les programmes suivants basés sur le même modèle.

2.4.2. Les obligations de l'exploitant

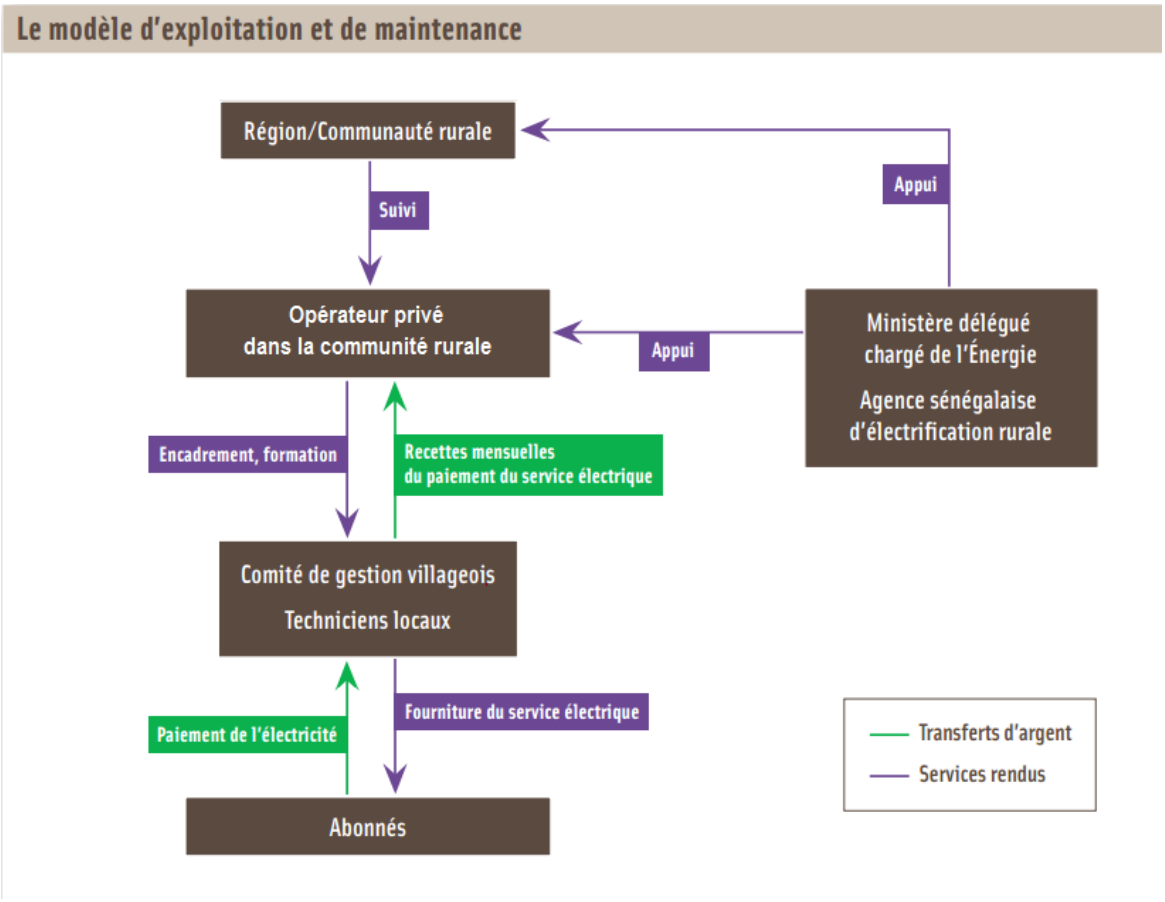
Un projet de long terme doit être un système à cycle fermé, Dans le cadre de relations contractuelles avec la communauté rurale et le ministère délégué chargé de l'Énergie, l'exploitant doit respecter un certain nombre de règles permettant d'assurer qualité de services et satisfaction de la clientèle. Pendant la durée de ce contrat, l'exploitant a l'obligation de maintenir les

infrastructures en parfait état de fonctionnement, en assurant un entretien régulier et en procédant au renouvellement des pièces en fin de vie.

: Image locale

2.4.3. Le rôle de l'exploitant au quotidien

Pour s'assurer de la bonne gestion des infrastructures par l'exploitant privé, un certain nombre de structures, locales ou nationales, sont impliquées. Les collectivités locales, et les organismes nationaux en charge de l'énergie sont en mesure de contrôler la qualité des installations et du service.



2.5. Coût

Les coûts d'exploitation annuels s'élèvent à 10000 euro pour l'ensemble du village. Ils ont été évalués en prenant en compte plusieurs points :

- le renouvellement du matériel (les batteries ainsi que les régulateurs devront être changés au bout de 3 ans) ;
- les charges du personnel (salaires, coûts de déplacement…) ;
- la maintenance (pièces détachées, consommables, outillage…) ;
- les frais de gestion (frais administratifs, fournitures, assurances des infrastructures…).

2.6. La Maintenance

Il est indispensable de veiller à ce que l'électrification ne soit pas une cause de plus grande injustice sociale, mais bien un facteur positif pour le développement. L'électrification rurale par énergies renouvelables est encore une modalité très innovante qui requiert un climat de confiance entre l'usager et l'exploitant. Ce dernier doit être capable d'informer la population sur les aspects technologiques (quand et comment sera mis en place le service, à quel coût…), de former les abonnés à l'usage de l'électricité (utilisation rationnelle de l'énergie, que faire en cas de faible ensoleillement…), d'informer régulièrement les usagers sur les changements relatifs au service (tarifs, raisons des coupures, évolution du nombre d'abonnés…), et de consulter régulièrement les usagers sur leurs attentes. L'électrification doit également s'accompagner d'un accès équitable à l'électricité et permettre aux populations défavorisées d'en bénéficier. Des modalités de paiement adaptées doivent être mises en place, permettant d'éviter les défaillances de paiement qui sont souvent les premières raisons des difficultés des programmes d'électrification rurale. L'exploitant doit sensibiliser les abonnés à la nécessaire régularité des paiements, et aux conséquences des défaillances sur le service électrique.

2.6.1. La rentabilité pour l'exploitant

Dans les projets d'accès à l'électricité en milieu rural, il est habituel de mener une analyse économique sur une durée de 20 ans. Ce choix est lié notamment à la durée de vie des équipements de production (20 à 30 ans). L'analyse économique prend aussi en compte un taux d'actualisation réel de 5 %, les coûts et recettes ainsi que les amortissements et impôts sur le bénéfice.

2.6.2. La rentabilité visée

- Dans ce secteur nouveau et considéré comme risqué, un retour sur investissements significatif est un élément important pour les investisseurs privés.
- L'hypothèse retenue est de viser un taux de rentabilité de 10 % sur 20 ans pour l'exploitant, ce qui représente un retour sur investissement significatif. Pour les investisseurs internationaux susceptibles d'appuyer l'exploitant (prêt ou apport en capital), le niveau de rentabilité visé est de 6 %.

2.7. Avantage et Limites

2.7.1. Avantages

Les panneaux solaires présentent de nombreux avantages :

- D'un point de vue écologique, les panneaux solaires sont une énergie propre non polluante pour l'environnement. Aucun gaz à effet de serre n'est rejeté et il n'y a aucun déchet radioactif produit.
- L'énergie solaire est inépuisable, contrairement aux énergies fossiles comme le charbon ou le pétrole qui sont pourtant encore plus utilisés que le solaire.
- Pour les endroits isolés ou les petites installations, rien de tel que les panneaux solaires pour les rendre autonomes.

2.7.2. Inconvénients et Limites

- Le principal inconvénient des panneaux solaires est le coût.

En effet, pour installer 1m² de panneaux solaires il faut compter 10000€ (installation + achat du panneau). Pour des productions importantes d'énergie, ce système n'est pas rentable. Il faut environ 3 ans pour que le panneau produise l'énergie qui a été nécessaire à sa construction, or un panneau a une durée de vie moyenne de seulement 25 ans!...Alors que l'énergie à base Diesel est moins cher et produit plus sur une plus courte durée.

- D'autre part, les quantités d'énergie produites sont liées au temps.

Pour qu'un panneau solaire fonctionne il faut du soleil. Ainsi pendant les jours de mauvais temps et la nuit ceux-ci ne produisent pas: on a ici une perte de temps conséquente. De plus, c'est en été que les panneaux solaires produisent le plus (longues journées) or nos besoins d'énergie sont plus faibles en été qu'en hiver... Ceci amènerait à devoir stocker l'énergie non utilisée, ce qui est compliqué et cher.

CONCLUSION

L'énergie est un secteur transversal. La crise énergétique vécue par le Sénégal en est une preuve. Celle-ci a résulté en une paralysie, par moments, du secteur des services et du secteur résidentiel qui consomment plus de 75% de l'électricité distribuée en basse tension. Cependant l'insuffisance de politiques énergétiques tenant compte des disponibilités énergétiques internes, telles que les énergies éoliennes, solaires, et une forte consommation de la biomasse (bois et charbon de bois), les chocs externes, et l'instabilité du cours du baril de pétrole ont fini par installer le secteur dans une précarité permanente.

BIBLIOGRAPHIE ET ABREVIATIONS

- **Etat des lieux en matière d'accès aux services énergétiques en milieu rural, Pape. Touty SOW et PNUD/PREP, janvier 2013**
- **Programme national d'investissement pour l'accès aux services énergétiques des populations rurales, Pape Touty SOW, PNUD/PREP, octobre 2013**

- **Situation de l'électrification rurale au Sénégal et Perspectives, ASER, Novembre 2012**
- **Lettre de politique de développement du secteur de l'énergie, volet politique de développement de l'électrification rurale, Avril 2006**
- **Lettre de Politique de développement du sous-secteur des combustibles domestiques, Gouvernement du Sénégal, Janvier 2004**
- **SENELEC : centre électrique du Sénégal**
- **SIE. (2012). Système d'information géographique**
- **Statistiques mondiales ; http//WWW.statistiques-mondiales.com**
- **SENELEC : Société Nationale d'Electricité**
- **Ministère de l'Energie**

- **AIE : Agence Internationale de l'Energie**
- **GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié**
- **ktep : Kilo Tep**
- **kWc : Kilowatt crête**
- **kWh : Kilowatt heure**
- **Tep : Tonne équivalent pétrole**
- **UEMOA : Union Economique et Monétaire Ouest Africaine**