



UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR

UFR SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département de Physique

Mention : Physique et Applications

Mémoire de MASTER

Spécialité : Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique

Option : Énergie Solaire et Bioénergie

Sujet :

**L'ELECTRIFICATION DE DEUX VILLAGES EN
BASSE CASAMANCE (SENEGAL) PAR UNE
CENTRALE HYBRIDE AUTONOME
(PHOTOVOLTAIQUE ET MACHINE
THERMODYNAMIQUE)**

Présenté par :

Ma Anta DIOP

Soutenu devant le jury :

Nom Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
KOBOR Diouma	Professeur Titulaire	Président de jury	UFR-ST, UASZ
DIEDHIOU Ansoumane	Maître de Conférences Assimilé	Rapporteur	UFR-ST, UASZ
THIAO Serigne	Maître de Conférences Titulaire	Examineur	UFR-ST, UASZ
Lavinia GROSSU	Maitre de Conférences HDR	Co-Encadrant	IUT de Ville d'AVRAY, UPN
MAILIER Loic	Professeur Agrégé	Co-Encadrant	IUT de Ville d'AVRAY, UPN
THIAME Moustapha	Professeur Assimilé	Co-Encadrant	UFR-ST, UASZ

DEDICACE

Je rends grâce à Dieu pour tous ses biens faits et de m'avoir donné la santé et la force me permettant d'accomplir ce travail.

Je dédie ce travail :

A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.

A mes chers frères et sœurs

A mes cousins

A mes amis

A mes camarades de promotion 2017-2022, particulièrement à mes ceux du MIER de Ziguinchor.

A celui qui nous a éduqué Al Mourchidou'Ham ainsi qu'à son Capitaine et à tous les Moustarchides du Monde.

REMERCIEMENTS

En préambule à ce mémoire je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire

Je tiens à remercier sincèrement Mon grand frère Papa Madiop DIOP qui n'a ménagé aucun effort pour notre réussite.

Je tiens à remercier madame Lavinia GROSU, monsieur Loic MAILLIER et monsieur Moustapha THIAME, qui en tant qu'Encadreurs de mémoire, se sont toujours montrés à l'écoute et très disponibles tout au long de la réalisation de ce mémoire ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'ils ont bien voulu me consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Je remercie Monsieur Diouma KOBOR pour avoir accepté de présider ce jury.

Je remercie Messieurs Ansoumane DIEDHIOU et Serigne THIAO pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je tiens à remercier aussi notre responsable de master Professeur Lat Grand NDIAYE.

Je ne pourrais pas terminer mes remerciements sans remercier tout le personnel de l'IUT Ville d'Avray qui est toujours là pour nous sans oublier mes camarades avec qui j'ai effectué le voyage, Mamadou, Adja, Fatou, Augustin Ndiogou et ceux de Nanterre, Papa Diallo, Makhtar et Samba.

RESUME

L'accès à l'électricité en zone rurale fait partie des plus grandes priorités des états sub-sahariens. L'objectif de cette étude est de regarder la possibilité d'électrifier les villages de Diongol et de Ngoniam, situés en basse Casamance, par une centrale hybride autonome composée d'un générateur photovoltaïque et d'une machine thermodynamique à la place d'un groupe électrogène. Pour ce faire, des études techniques et financières sont effectuées.

L'étude technique qui revient à observer le comportement d'une machine utilisant le solaire thermodynamique en fonction de la pression, de la température, du type de fluide de travail et des rendements des composants comme la pompe et la turbine. Les résultats obtenus de cette étude ont permis de confirmer la possibilité de fonctionnement de la machine dans les conditions climatiques des deux villages. Également l'étude financière réalisée après le remplacement du groupe électrogène par une machine thermodynamique à concentration, a montré que ce remplacement a permis de réaliser des économies en termes d'investissement non négligeables.

Mots clés : zone rurale, centrale hybride, photovoltaïque, groupe électrogène, solaire thermodynamique, autonome

ABSTRACT

Access to electricity in rural areas is one of the highest priorities of sub-Saharan states. The objective of this study is to look at the possibility of electrifying the villages of Diongol and Ngoniam, located in Lower Casamance, by an autonomous hybrid power plant composed of a photovoltaic generator and a thermodynamic machine instead of a generator. To this end, technical and financial studies are carried out.

The technical study is to observe the behaviour of a machine using thermodynamic solar energy as a function of pressure, temperature, the type of working fluid and the efficiency of components such as the pump and turbine. The results obtained from this study confirmed the possibility of the machine operating in the climatic conditions of the two villages. Also, the financial study carried out after the replacement of the generator with a concentrated thermodynamic machine showed that this replacement resulted in significant savings in terms of investment.

Keywords: rural area, hybrid power plant, photovoltaic, generator, solar thermodynamic, autonomous

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME.....	iii
ABSTRACT	iii
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
ACRONYME	ix
NOMENCLATURE.....	x
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1 CHAPITRE I : PRÉSENTATION DES DEUX VILLAGES ET DE LA CENTRALE HYBRIDE AUTONOME	2
1.1 Présentation des deux villages	2
1.1.1 Localisation et topographie de la zone à électrifier.....	2
1.1.2 Données météorologiques	2
1.1.3 Principales activités économiques de subsistance.....	4
1.1.3.1 L’agriculture	4
1.1.3.2 L’exploitation forestière.....	5
1.1.3.3 Le commerce et la transformation	5
1.1.4 Détermination de la capacité de paiement des deux villages	6
1.2 Présentation de la centrale hybride autonome	7
1.2.1 Généralité sur le système photovoltaïque.....	10
1.2.1.1 Les panneaux photovoltaïques	10
1.2.1.2 Les batteries	10
1.2.1.3 Les onduleurs et régulateurs	11
1.2.1.4 Les câbles.....	12
1.2.1.5 Entretien des éléments du système photovoltaïque.....	12
1.2.2 Généralité sur les machines thermodynamiques à Cycle Organique de Rankine (ORC)	14
1.2.2.1 L’impact environnemental des fluides organiques ou frigorigènes	15
1.2.2.2 Présentation de la source de chaleur du Cycle Organique de Rankine.....	17
2 CHAPITRE II : METHODES ET MATERIELS	20
2.1 Les sujets	20
2.2 La méthodologie	21
2.2.1 Déroulement de l’étude technique.....	21

2.2.2	Déroulement de l'étude financière	23
2.3	Analyse des données.....	23
2.3.1	Présentation du logiciel et des formules utilisées pour effectuer l'étude paramétrique.....	23
2.3.2	Présentation du logiciel et des formules utilisées pour réaliser l'étude financière. 25	
3	CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	29
3.1	Résultats de l'étude technique ou paramétrique	29
3.2	Les résultats de l'étude financière	37
	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	45
	BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE	46
	ANNEXE	I

LISTE DES FIGURES

Figure1. 1: Carte montrant la position géographique de la commune de Suelle et des villages de Ngoniam et de Diongol. (Maillier 2021).....	2
Figure1. 2: Répartition du potentiel électrique photovoltaïque du Sénégal de 1994 à 2018. (« Atlas solaire mondial » s. d.)	3
Figure1. 3: Répartition de l'Irradiation Normale Directe du Sénégal de 1994 à 2018. (« Atlas solaire mondial » s. d.)	4
Figure1. 4: Images de blocs maraîchers à Ngoniam et Diongol. (AGIR 2018).....	5
Figure1. 5: Image d'une unité de transformation de céréales de Ngoniam. (AGIR 2018).....	6
Figure1. 6: Système hybride avec bus AC et convertisseur multifonctionnel. (Moine 2016) ..	9
Figure1. 7: Schéma électrique de l'installation hybride. (Maillier 2021).....	9
Figure1. 8: Agencement des différents éléments du système photovoltaïque. (« RoyEnergie-SchemaCellule-V2-scaled-1030x950.jpg (1030×950) » s. d.).....	10
Figure1. 9: Image d'onduleurs photovoltaïques et à batterie. (AG s. d.).....	12
Figure1. 10: Image de câble de connexion de panneau photovoltaïque. (« Câble pour panneau solaire Solar Câble L=5m/6sqmm MC4-M/F conn. (PV- » s. d.).....	12
Figure1. 11: Image d'une manche à balais télescopique. (« Manche balais télescopique » s. d.).....	13
Figure1. 12: Image d'un pèse acide GEFO CENTRA. (« Pèse acide GEFO CENTRA » s. d.)	14
Figure1. 13: Schéma de principe d'un Cycle Organique de Rankine. (Enertime 2014).....	15
Figure1. 14: Image des quatre types de capteurs solaires thermiques à concentration. (Todoroff 2018).....	17
Figure1. 15: Un concentrateur photovoltaïque cylindro-parabolique sur tracker un axe. (Weick 2017).....	18
Figure2. 1: Image d'un type d'habitat par concession. (AGIR 2018).....	20
Figure2. 2: Représentation d'un cycle à vapeur simple avec le logiciel Thermoptim	22
Figure2. 3: Logo du logiciel Thermoptim (« Bienvenue sur le site de S4E2 » s. d.).....	25
Figure2. 4: Logo du logiciel Sunny Design	25
Figure3. 1: Evolution du rendement thermique en fonction de la pression de sortie de la pompe	30
Figure3. 2: Evolution du rendement exergetique en fonction de la pression de sortie de la pompe	30

Figure3. 3: Evolution du rendement thermique en fonction des fluides de travail	31
Figure3. 4: Evolution du rendement exergetique en fonction des fluides de travail.....	31
Figure3. 5: Evolution du rendement thermique en fonction de la température de de surchauffe	32
Figure3. 6: Evolution du rendement exergetique en fonction de la température de de surchauffe	32
Figure3. 7: Evolution du rendement thermique en fonction de la pression d'entrée de la pompe	33
Figure3. 8: Evolution du rendement exergetique en fonction de la pression d'entrée de la pompe	33
Figure3. 9: Evolution du rendement thermique en fonction du rendement de la pompe	34
Figure3. 10: Evolution du rendement exergetique en fonction du rendement de la pompe ...	34
Figure3. 11: Evolution du rendement thermique en fonction du rendement de la turbine.....	35
Figure3. 12: Evolution du rendement exergetique en fonction du rendement de la turbine ...	35
Figure3. 13 : Données de configuration du système photovoltaïque	39
Figure3. 14: Configuration du système hybride composé comprenant un groupe électrogène	39
Figure3. 15: Données de configuration du nouveau système photovoltaïque	42
Figure3. 16: Configuration du système hybride composé comprenant une machine thermodynamique.....	42
Figure3. 17: Distribution de l'énergie en fonction du champ photovoltaïque, du parc de batteries et de la machine thermodynamique.	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau1. 1: Données météorologiques moyennes mensuelles du village de Diongol (PVGIS api TMY 2019).....	3
Tableau1. 2: Catégorisation théorique des ménages et pourcentage de représentativité.....	7
Tableau1. 3 : Tableau d'évaluation de la capacité de paiement des ménages.(AGIR 2018)....	7
Tableau1. 4: Etude comparative de quelques batteries à plomb acide. (« Batterie pour Panneau Solaire : Comment Choisir ? Quelle Technologie ? » s. d.).....	11
Tableau1. 5 : Impact environnemental de différents fluides organiques ou frigorigènes. (« Fluides frigorigènes » 2007)	16
Tableau1. 6: Comparaison des différentes technologies de concentrations. (Thiam 2022) ...	18
Tableau3. 1: Évolution de la machine thermodynamique en fonction de la pression de sortie de la pompe. 30	
Tableau3. 2: Évolution de la machine thermodynamique en fonction des fluides de travail. 31	
Tableau3. 3: Évolution de la machine thermodynamique en fonction de la température de surchauffe.	32
Tableau3. 4: Évolution de la machine thermodynamique en fonction de la pression d'entrée de la pompe.	33
Tableau3. 5: Évolution de la machine thermodynamique en fonction de la pression d'entrée de la pompe.	34
Tableau3. 6: Evolution de la machine thermodynamique en fonction du rendement de la pompe	35
Tableau3. 7: Besoins énergétiques des villages de Diongol et de Ngoniam	37
Tableau3. 8: Cout d'investissement du système hybride comprenant un groupe électrogène	40
Tableau3. 9: Répartition des besoins énergétique en fonction des générateurs.....	41
Tableau3. 10 : Cout d'investissement du système hybride composé d'un système hybride et d'une machine thermodynamique	43

ACRONYME

DNI : Direct Normal Irradiation

ORC : Organic Rankine Cycle

PV : Photovoltaïque

kWh : Kilowatt heure

DC : Courant continu

AC: Courant alternatif

DOD: Depth Of Discharge (Profondeur de Décharge)

AGM: Absorbed Glass Mat (Tapis de Verre Absorbant)

V : Volt

OPZS : Batterie Plomb à électrolyte liquide

OPZV : Batterie tubulaire étanche avec une fixation de l'électrolyte dans le gel

Ah : Ampère heure

CSP : Concentrated Solar Power

CPV : Concentrated Photovoltaic

ASER : Agence Sénégalaise de l'Electrification Rurale

AGIR : Agence pour la Gestion Immobilière et le Recouvrement

HFC: Hydrofluorocarbon

HFO: Hydrofluoroléfine

ODP: Ozone Depletion Potential

GWP: Global Warming Potential

TEWI: Total Equivalent Warming Impact

NOMENCLATURE

R245fa : pentafluoropropane

R134a : tétrafluoroéthane

R143a : 1,1,1-trifluoroéthane

R600a : isobutane

R125 : pentafluoroéthane

R32 : difluorométhane

R11 : trichlorofluorométhane

R12 : dichlorodifluorométhane

R717 : ammoniac

R744 : dioxyde de carbone

R290 : propane

R22 : chlorodifluorométhane

R407c : Mélange zéotropique de R134a, R125 et R32

R410A : Mélange zéotropique de R125 et R32

R427A : Mélange zéotropique de R32, R125, R143a et R134a

R417A : Mélange zéotropique de R125, R134a, et du butane

R422D : Mélange zéotropique de R134a, R125 et R600a

R404A : Mélange zéotropique de R125, R143a et R134a

CO₂ : Dioxyde de carbone

NO_x : Oxyde d'azote

CO : Monoxyde de carbone

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'électrification c'est le fait de doter un matériel électrique, une installation ou un ouvrage de l'énergie électrique. L'accès à l'électricité est l'un des défis qui n'est toujours pas encore relevé par la grande partie des états en Afrique Sub-saharienne et plus particulièrement en zone rurale qui est un milieu caractérisé d'une part, par la prépondérance de l'agriculture comme secteur économique et d'autre part par le manque d'infrastructures et la faible densité d'habitat. Au Sénégal, en 2018, le taux d'électrification nationale est estimé à 69,6% dont 93,6% en milieu urbain et 42,30% en milieu rural soit 526.231 sur 912.011 ménages qui n'ont pas accès à l'électricité (SIE-Sénégal 2019). Depuis lors, le taux d'électrification rurale a connu des avancés significatifs en passant de 42,30% à 54% entre 2018 et 2019.(Akinocho s. d.) En 2021, ce taux est estimé à 65% et devrait être porté à 85% en 2023.(« Le taux d'électrification rurale en 2023.(ministre Budget) » s. d.) C'est pourquoi l'État du Sénégal, par le biais du Ministère du Pétrole et des Énergies, s'est fixé comme objectif l'atteinte de l'accès universel à l'électricité en 2025 (Ba 2018). Pour réussir ce programme, il compte sur le solaire photovoltaïque qui déjà en 2018, représentait une part de 7,51% sur l'électrification rurale (SIE-Sénégal 2019). Par contre, l'intermittence de l'énergie solaire est l'un des « tendons d'Achille » de cette filière. Donc pour avoir suffisamment d'énergie pendant la nuit ou même dans les périodes de faible ensoleillement, on utilise les Systèmes Hybrides d'Energie (SHE), c'est-à-dire des systèmes ayant au moins deux sources d'énergies. Pour l'électrification des sites isolés, les installations hybrides utilisées sont le plus souvent constituées d'un système photovoltaïque et d'un groupe électrogène en appoint (Moine 2016). Mais le problème avec le groupe électrogène est que son coût d'exploitation et d'entretien est généralement élevé. En plus, la mise en marche du générateur de Diesel provoque des émissions de polluants comme le dioxyde de carbone (CO₂), le monoxyde de carbone (CO) etc... (Ibrahim, Ilinca, et Perron 2008).

Notre travail consiste à étudier la possibilité de remplacer le groupe électrogène par une machine thermodynamique alimentée par l'énergie solaire. La machine est à Cycle Organique de Rankine (ORC). Une étude technico-économique permettrait de voir la viabilité et l'intérêt économique de la machine thermodynamique par rapport au groupe électrogène. Ce travail est composé de trois chapitres. Dans le premier chapitre, les présentations des deux villages et de la centrale hybride autonome sont faites. Le deuxième chapitre est dédié aux matériels et méthodes utilisés pour réaliser l'étude. Enfin le troisième chapitre porte sur les résultats et discussions.

1 CHAPITRE I : PRÉSENTATION DES DEUX VILLAGES ET DE LA CENTRALE HYBRIDE AUTONOME

Précédemment à notre étude, plusieurs auteurs, blogs et journaux ont eu à mener des recherches sur les centrales hybrides automnes. Donc une mise au point des principales recherches et réalisations s'impose. Avant cela, nous allons d'abord présenter les deux villages ciblés.

1.1 Présentation des deux villages

1.1.1 Localisation et topographie de la zone à électrifier

L'association française Kassoumaï⁷⁸ a un projet d'électrification de deux villages en basse Casamance. Les deux villages retenus sont les villages de Diongol et de Ngoniam (AGIR 2018). Ils se situent dans la commune de Suelle, rattachée à l'arrondissement de Sindian qui se trouve à Bignona, un des départements de la région de Ziguinchor. Les deux villages sont suffisamment proches pour envisager de les coupler sur un réseau électrique commun alimenté par une seule centrale (Maillier 2021). La figure 1.1 montre la position géographique de la commune de Suelle et des deux villages dans cette dernière.

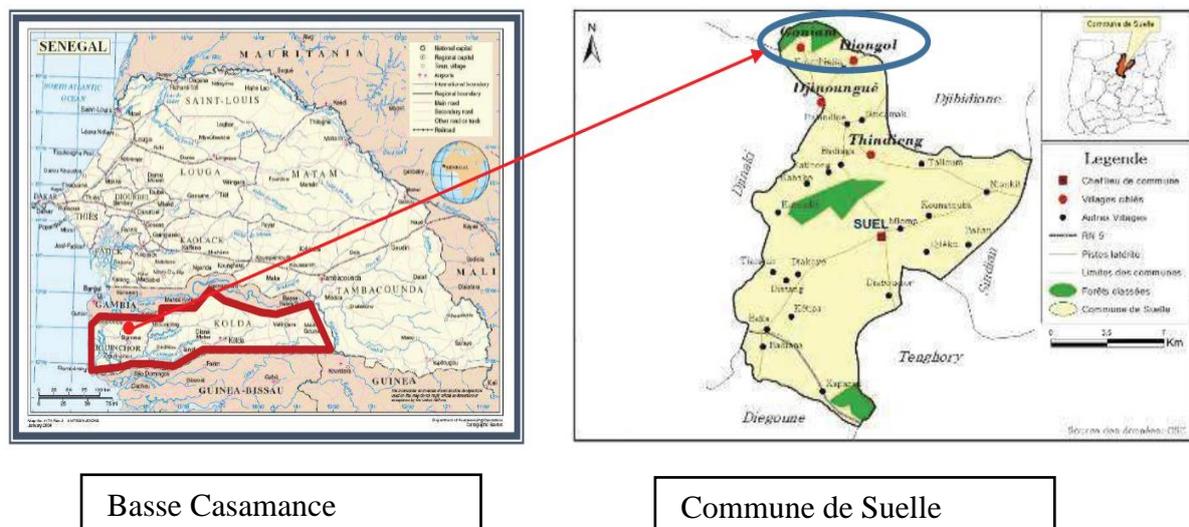


Figure1. 1: Carte montrant la position géographique de la commune de Suelle et des villages de Ngoniam et de Diongol. (Maillier 2021)

1.1.2 Données météorologiques

A l'image de la région de Ziguinchor, les deux villages ont un climat tropical de savane chaud et plus ou moins sec. Les températures sont en permanence assez élevées le jour et descendent rarement en dessous de 20°C la nuit, les mois de décembre et janvier sont les plus frais, les plus chauds sont ceux de mai et de juin avec des températures supérieures à 40°C. La proximité des deux villages fait que leurs conditions climatiques sont assez similaires. Avec un rayonnement

horizontal global moyen annuel de 6,08 kWh/m²/jour, les deux villages ont un bon potentiel électrique photovoltaïque (figure 1.2) pour abriter une mini centrale solaire photovoltaïque. Quant au tableau 1.1, il nous montre les données climatiques moyennes mensuelles de Diongol.

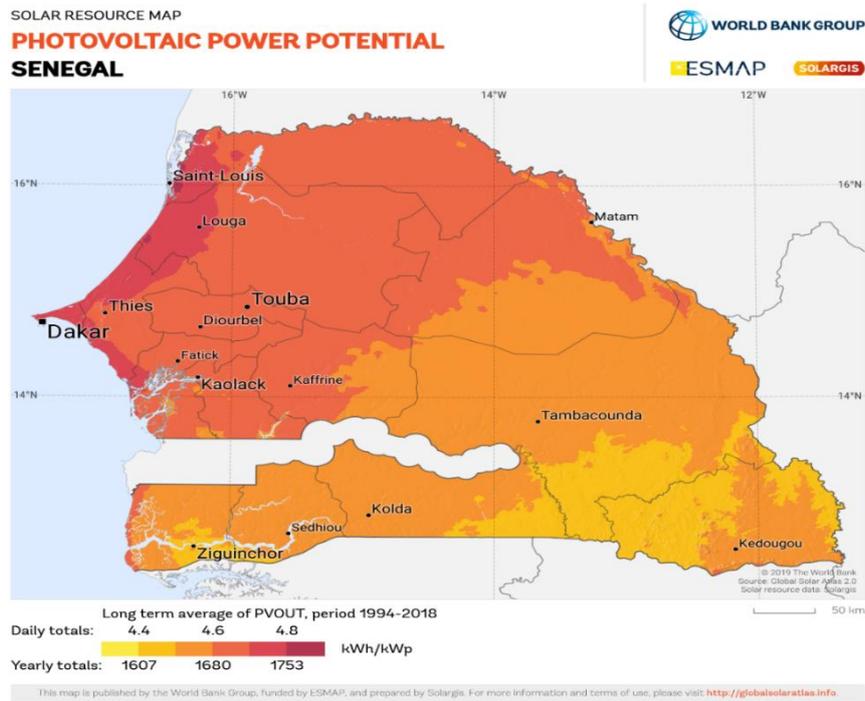


Figure1. 2: Répartition du potentiel électrique photovoltaïque du Sénégal de 1994 à 2018. (« Atlas solaire mondial » s. d.)

Tableau1. 1: Données météorologiques moyennes mensuelles du village de Diongol (PVGIS api TMY 2019)



PVsyst V7.2.8

Geographical Site		Situation												
Diongol		Latitude	13,05 °N											
Senegal		Longitude	-16,32 °W											
		Altitude	24 m											
		Time zone	UTC											
Monthly Meteo Values														
Source PVGIS TMY: SARAH, COSMO or NSRDB														
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Year	
Horizontal global	5.53	6.51	7.21	7.52	7.19	5.84	5.48	5.08	5.58	5.96	5.54	5.51	6.08	kWh/m ² /day
Horizontal diffuse	1.81	1.79	2.01	2.02	2.27	2.71	2.74	2.65	2.59	2.22	1.89	1.67	2.20	kWh/m ² /day
Extraterrestrial	8.50	9.35	10.11	10.56	10.61	10.52	10.51	10.52	10.25	9.58	8.72	8.22	9.79	kWh/m ² /day
Clearness Index	0.651	0.696	0.713	0.712	0.678	0.556	0.522	0.483	0.544	0.622	0.635	0.671	0.621	ratio
Ambient Temper.	24,6	27,4	27,3	26,6	28,2	28,0	27,2	26,1	26,3	27,4	27,7	26,1	26,9	°C
Wind Velocity	4,4	3,1	3,3	2,5	2,7	2,6	2,4	2,6	1,8	1,6	2,0	2,9	2,7	m/s

Pour étudier la possibilité d'implantation de technologies à concentration solaire, il faut impérativement connaître le potentiel en rayonnement normal direct. Car c'est seulement ce rayonnement direct que l'on peut concentrer. La figure 1.3 montre le potentiel en irradiation normale directe (DNI) du Sénégal.

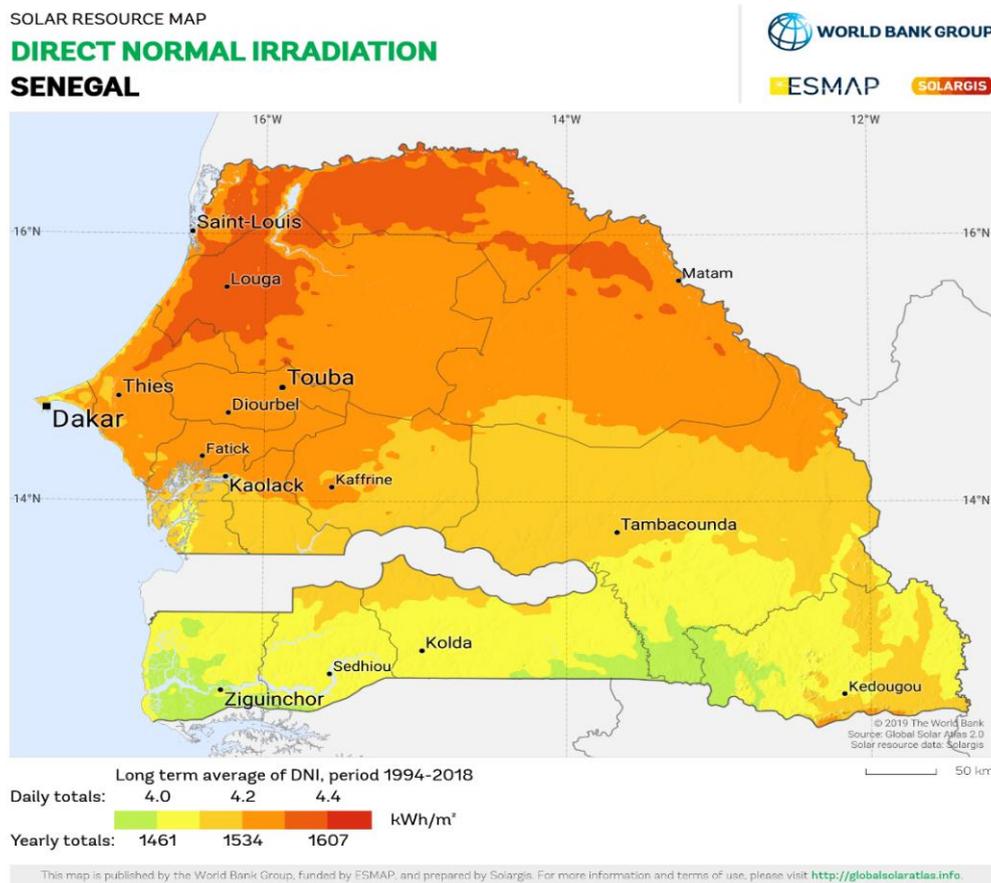


Figure1. 3:Répartition de l'Irradiation Normale Directe du Sénégal de 1994 à 2018. (« Atlas solaire mondial » s. d.)

Le DNI annuel de la basse Casamance est compris entre 1400 kWh/m² et 1500 kWh/m² ce qui n'est pas très favorable au bon fonctionnement d'un système à concentration solaire. Néanmoins, les cycles ORC qui, comportant des fluides ayant une basse température d'évaporation pourraient très bien fonctionner dans ces conditions.

1.1.3 Principales activités économiques de subsistance

1.1.3.1 L'agriculture

Comme la plupart des zones rurales, l'agriculture est la principale activité économique des deux villages. Elle comprend deux volets :

- ☞ Les grandes cultures d'hivernage telles que le riz, mil, arachide, maïs, sorgho, fonio, niébé et le manioc.
- ☞ Les cultures de saison sèche ou de rente telles que le maraîchage et l'arboriculture fruitière, etc... (AGIR 2018)

Sur le plan alimentaire, la situation des villages n'est peut-être pas alarmante à cause des apports supplémentaires fournis par la production fruitière et les produits de cueillette, mais les paysans ne sont pas à l'abri d'une crise alimentaire qui peut surgir à tout moment.



Figure1. 4: Images de blocs maraîchers à Ngoniam et Diongol. (AGIR 2018)

1.1.3.2 L'exploitation forestière

La zone étudiée dispose d'importantes productions forestières permettant d'améliorer les revenus des ménages. Les produits de cueillette tels que le maad (*saba senegalensis*), le solom (*dialium guineensis*), le ditakh (*detarium senegalensis*), le mampatan (*parinari excelsa*), le néré (*parkia biglobosa*), le toll (*landolphia heudelotii*), le pain de singe et les palmistes constituent d'importantes sources de revenus venant en augmentation du pouvoir d'achat des paysans et de la sécurité alimentaire. La cueillette du miel constitue aussi une source de revenus monétaires additionnels. (AGIR 2018)

1.1.3.3 Le commerce et la transformation

Le commerce est généralement perçu par la plupart des paysans comme une activité en aval des productions agricoles et horticoles. Les produits commercialisés proviennent essentiellement des activités agricoles, de la cueillette et de l'arboriculture fruitière. Les produits transformés tels que les balais (produits à partir des nervures des feuilles de palmier), l'huile de palme, le maad, le pain de singe et le « nététo » contribuent également à l'amélioration du pouvoir d'achat des paysans. La figure 1.5 ci-dessous donne une illustration d'unités de transformation.



Figure1. 5: Image d'une unité de transformation de céréales de Ngoniam. (AGIR 2018)

1.1.4 Détermination de la capacité de paiement des deux villages

L'agriculture et la transformation des récoltes obtenus constituent la principale source de revenus des deux villages. A cela s'ajoute, des revenus des autres membres résidents de la famille et des envois en numéraire ou en vivres des ressortissants y compris la diaspora. Pour se faire, nous prenons comme indice de catégorisation le Salaire Minimum Agricole Garantie (SMAG), fixé au Sénégal depuis le 1^{er} Juin 2018 à 213,92 francs CFA par heure de travail agricole. (Jeune Afrique 2018)

La journée de travail en milieu rural commence de 08 heures à 12 heures et de 15 heures à 18 heures, soit une durée de 7 heures maximum. En travaillant 26 jours par mois, le revenu mensuel d'un paysan sur la base du SMAG est de :

$$7h/j \times 213,92FCFA/h \times 26j = 38\,933,44\,FCFA$$

En élargissant la base en prenant une fourchette de 0 à 40 000 FCFA, on peut supposer que les ménages dont les revenus sont inférieurs à 40 000 FCFA peuvent théoriquement être considérés comme des « **ménages à revenus faibles** ». Ceux dont les revenus sont compris entre 40 000 et 99 000FCFA sont considérés comme des « **ménages à revenus moyens** » enfin ceux dont les revenus sont supérieurs à 100 000F comme des « **ménages aisés** ». Cette classification devra cependant être relativisée car les revenus des ménages ne sont généralement pas connus avec précision. D'autre part, un ménage peut être considéré comme pauvre alors qu'il ne l'est pas en réalité. (AGIR 2018)

Dans le tableau ci-dessous, nous avons un classement théorique des 68 ménages en fonction des trois catégories de revenus.

Tableau1. 2: Catégorisation théorique des ménages et pourcentage de représentativité

Nom du Village	Nombre total de ménages dans le village	Nombre de ménages enquêtés	Catégorisation par niveau de revenus		
			Ménages à revenus faibles $0 \leq RM \leq 40\ 000$	Ménages à revenus moyens $40\ 000 \leq RM \leq 99\ 000$	Ménages aisés $RM \geq 100\ 000$
Diongol	33	33	17	10	06
Ngoniam	35	35	16	14	05
Total	68	68	33	24	11
Total (%)	100%	100%	48,53%	35,29%	16,18%

Le revenu mensuel moyen de la catégorie des « **ménages à revenus faibles** » est estimé à 32 114 FCFA, celui des « **ménages à revenus moyens** », est estimé à 65 348 FCFA enfin celui de « **ménages aisés** », à 113 504 FCFA. D’après les enquêtes réalisées par le cabinet AGIR, les ménages aisés, à revenus faibles et moyens, dépensent environ 16% de leurs revenus pour les besoins de santé contre 8% pour l’éducation des enfants, 4% à 8% pour les applications énergétiques et le reste varie de 35% à 68% en besoins divers tels que : habillement, cérémonies, loisirs et même une partie de l’alimentation, ...). (AGIR 2018) Dans le tableau ci-dessous, nous avons une répartition des dépenses des différentes catégories selon les besoins.

Tableau1. 3 : Tableau d’évaluation de la capacité de paiement des ménages.(AGIR 2018)

Catégorie sociale	Dépenses énergétiques moyennes mensuelles actuelle par ménage	Dépenses mensuelles moyennes pour la scolarité	Dépenses moyennes mensuelles pour la santé	Autres dépenses (habillement, cérémonies, loisirs, ...y compris une partie de l'alimentation)	Total des dépenses moyennes du ménage	Revenu moyen du ménage	Epargne moyenne théorique calculée	Epargne moyenne théorique déclarée par les ménages	Dépenses énergétiques moyennes proposées en paiement mensuel en cas de branchement	Sommes moyennes proposées pour le raccordement à une installation solaire
Ménages pauvres	2 600	2 570	5 140	14 500	24 810	32 114	7 304	4 320	7 000	25 000
Ménages moyens	4 530	5 228	10 455	23 400	43 613	65 348	21 735	17 000	12 000	30 000
Ménages aisés	5 000	9 080	18 160	45 265	77 505	113 504	35 999	30 000	17 000	35 000

1.2 Présentation de la centrale hybride autonome

Une centrale hybride autonome est un système ayant plus d’une source d’énergie et capable de fournir à n’importe quelle période l’énergie électrique demandée par l’installation. Elle peut être classée sous trois catégories :

- ☞ systèmes hybrides avec ou sans système de stockage ;
- ☞ systèmes hybrides avec la présence ou l’absence de source d’énergie conventionnelle ;
- ☞ systèmes hybrides composés uniquement de sources d’énergies renouvelables. (Karité et Cherkaoui 2019)

Les systèmes avec stockage sont plus adaptés pour l'alimentation d'habitations individuelles, de refuges de montagne, des relais de télécommunications de forte puissance, pour l'électrification villageoise. Car en journée, le générateur photovoltaïque charge la batterie et alimente simultanément l'onduleur, qui convertit la tension continue en tension alternative et permet l'alimentation des récepteurs fonctionnant en alternatif. En cas d'insuffisance d'ensoleillement ou de plus forte consommation des récepteurs, un groupe électrogène de secours ou d'appoint permet l'alimentation directe des récepteurs et la recharge de la batterie pour assurer la continuité de service. Par contre, pour l'électrification de gros villages et pour l'alimentation électrique de mines d'extraction de matières premières nécessitant une puissance élevée, le système hybride sans stockage est plus utilisé. Dans ce cas, ce sont les groupes électrogènes qui alimentent en permanence le réseau. Le générateur PV injecte sur le réseau une puissance variable en fonction de l'ensoleillement. Toute l'énergie délivrée par le générateur PV n'est pas à fournir par les groupes électrogènes et réduit de fait la consommation de carburant et les coûts d'exploitation. (Moine 2018)

Concernant les centrales hybrides avec la présence de sources d'énergie conventionnelles, ils sont plus utilisés dans des sites venteux ou fortement ensoleillés. Ces centrales sont souvent constituées d'installations photovoltaïques et de systèmes à diesel. Elles peuvent être également composées de système éolien et d'une machine fonctionnant avec du diesel. (Karité et Cherkaoui 2019) Il existe des cas où ces trois sources (photovoltaïque, éolien et diesel) sont combinées dans un même système hybride d'énergie. (Saheb-Koussa et Belhamel 2007)

Par contre, les systèmes hybrides sans sources d'énergie conventionnelle sont généralement utilisés dans les régions où l'accès au réseau ou à l'approvisionnement en carburant est coûteux, voire difficile. Dans ce cas, seules les sources d'énergie renouvelables sont utilisées.

L'hybridation des sources d'énergies présente de nombreux avantages par rapport au système qui fonctionne avec seulement du diesel. Sur le plan économique, le coût du kWh fourni par le système hybride est trois fois moins cher que celui fourni par le groupe électrogène seul. Sur le plan environnemental, une réduction de 83% des émissions de CO₂ et de NO_x est engendrée par l'utilisation des installations hybrides. (Rachid et al. 2018)

Le système hybride avec PV peut se présenter sous différentes configurations. Parmi elles, on peut citer :

- ☛ les systèmes avec bus DC avec ou sans convertisseur multifonctionnel,

- ☞ les systèmes avec bus AC et convertisseur multifonctionnel,
- ☞ les systèmes avec bus DC et AC et convertisseur multifonctionnel. (Moine 2016)

Pour l'électrification des deux villages, l'architecture choisie est le système avec bus AC et convertisseur multifonctionnel avec dans notre cas un remplacement du groupe électrogène par une machine thermodynamique. Une représentation de cette configuration est donnée sur la figure 1.6. Sur la figure 1.7, vous trouverez une représentation plus détaillée avec les différents composants du système photovoltaïque comme les panneaux, les batteries les onduleurs photovoltaïque et multifonctionnels, les différents consommateurs et un générateur secondaire de 15 kVA qui est une machine thermodynamique etc....

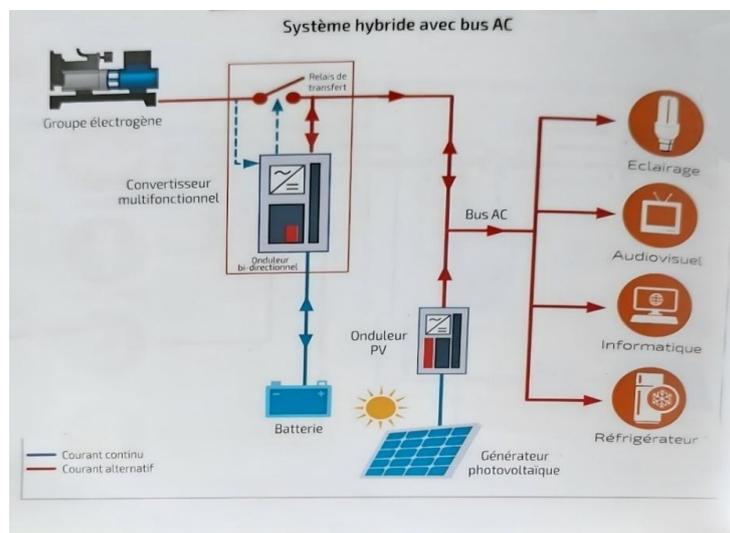


Figure1. 6: Système hybride avec bus AC et convertisseur multifonctionnel. (Moine 2016)

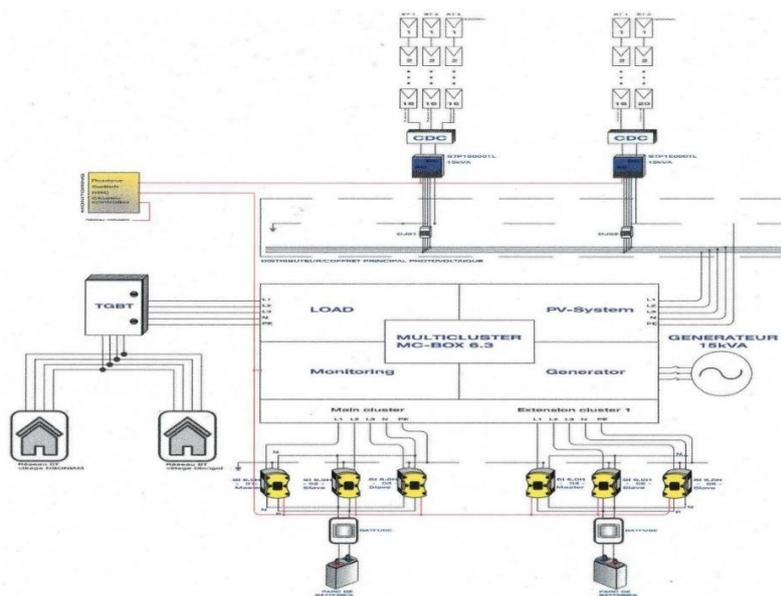


Figure1. 7: Schéma électrique de l'installation hybride. (Maillier 2021)

1.2.1 Généralité sur le système photovoltaïque

Le solaire photovoltaïque fait partie de l'une des technologies les plus matures. Cette maturité, elle le doit à des décennies d'évolutions. L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par le français Alexandre-Edmond Becquerel. En 1954, la première cellule photovoltaïque avec un rendement de 6% est fabriquée par les chercheurs américains Gerald Pearson, Darryl Chapin et Calvin Fuller. C'est dans les années 60 qu'on a les premières utilisations des cellules photovoltaïques. Comme toute technologie, cette utilisation s'effectue d'abord dans le domaine spatial avec le satellite Sputnik III. Il faut attendre jusqu'à la moitié des années 70 pour voir l'application terrestre du solaire photovoltaïque avec la construction de la première maison alimentée par des cellules PV. (Smets et al. 2016) Aujourd'hui, le solaire photovoltaïque est utilisé dans différents domaines comme celui des centrales raccordées au réseau ou autonome pour l'électrification de sites isolés, l'alimentation des moyens de transport etc.

Le système PV a généralement comme éléments de base les panneaux photovoltaïques, les batteries, l'onduleur, le régulateur et les câbles.

1.2.1.1 Les panneaux photovoltaïques

Ils transforment l'énergie solaire en énergie électrique. C'est le générateur du système PV. L'ensemble des cellules photovoltaïques forme un module qui regroupé avec d'autres donne un champ photovoltaïque. La figure 1.8 montre l'agencement de ces éléments.

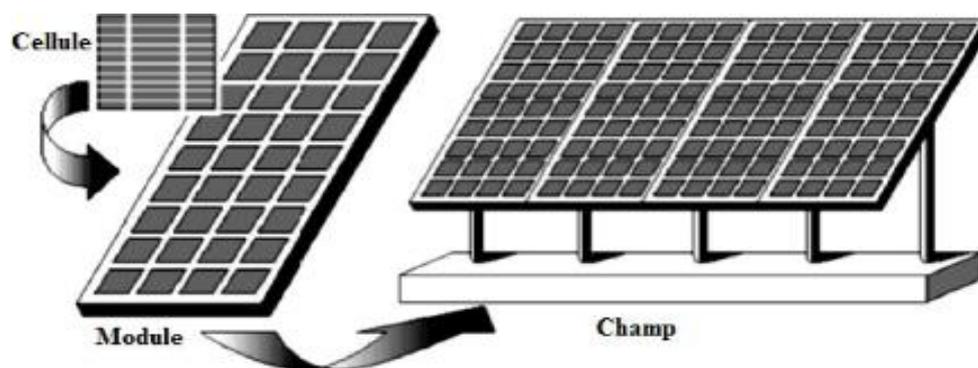


Figure1. 8: Agencement des différents éléments du système photovoltaïque. (« RoyEnergie-SchemaCellule-V2-scaled-1030x950.jpg (1030×950) » s. d.)

1.2.1.2 Les batteries

Elles stockent l'énergie provenant des panneaux photovoltaïques pour ensuite la restituer pendant la nuit ou les périodes de faible ensoleillement. Selon la technologie, la durée de vie moyenne des batteries est estimée entre 3 et 15 ans. (« Batterie pour Panneau Solaire : Comment

Choisir ? Quelle Technologie ? » s. d.) Mais généralement elles ne tiennent pas plus de 10 ans du fait des conditions climatiques et plus particulièrement la température. Ci- dessous, un tableau comparatif de quelques technologies de batteries.

Tableau1. 4: Etude comparative de quelques batteries à plomb acide. (« Batterie pour Panneau Solaire : Comment Choisir ? Quelle Technologie ? » s. d.)

	Batterie ouverte semi traction	Batterie ouverte Plaque épaisse US	Batterie ouverte Tubulaire	Batterie Gel	AGM Décharge profonde	AGM Standard	2V OPZS	2V OPZV
Étanche	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Oui
Durée de vie (Nombre de cycles à 50 % DOD)	400 - 600	550 - 1200	env. 2000	600 - 2500	env. 1000	400 - 600	2500 - 3000	3000 - 3500
Durée de vie (Utilisation en solaire)	4 - 5 ans	4 à 7 ans	5 à 8 ans	3 à 15 ans	4 à 7 ans	3 à 5 ans	> 8 ans	> 12 ans
Capacité à supporter la décharge profonde	+	+++	+++	+++	+++	-	+++	+++
Résistance aux températures élevées	++	++	+++	++	+	+	+++	++
Rendement de charge Batterie neuve (diminue avec l'âge des batteries)	85 - 90 %	85 - 90 %	85 - 90 %	85 - 90 %	88 - 96 %	88 - 96 %	85 - 90 %	85 - 90 %
Vitesse de charge	++	++	++	+	+++	+++	++	+
Auto Décharge (augmente avec l'âge des batteries)	---	----	---	-	-	-	---	-
Tolérance / mauvais paramètres de charge solaire	++	++	+++	+	++	++	+++	+
Utilisation Solaire plus Groupe électrogène	++	++	+++	+	+++	+++	++	+
Capacité Maximale d'une batterie C100	250 Ah (12V)	Quelques centaines Ah (6V)	Quelques centaines Ah (6V)	Quelques centaines Ah (6V)	Quelques centaines Ah (6V)	250 Ah (12V)	Quelques milliers Ah	Quelques milliers Ah
Prix (€ / Ah), en multiple / BO semi traction	Base 100	120 - 160	160 - 180	180 - 300	180 - 220	180- 220	220 - 400	300 - 500

1.2.1.3 Les onduleurs et régulateurs

Les onduleurs gèrent la conversion de la tension continue en tension alternative et les régulateurs permettent de rallonger la durée de vie des batteries en régulant la charge et la décharge de ces dernières. Dans la plupart des centrales d'aujourd'hui, on rencontre de plus en

plus des onduleurs multi fonctionnels ou à batterie qui gèrent les deux fonctions. Il en existe également d'autres types comme l'onduleur photovoltaïque, l'onduleur string et l'onduleur central pour les centrales de grandes puissances. Dans la figure 1.9 ci-dessous, des onduleurs photovoltaïques et à batterie.

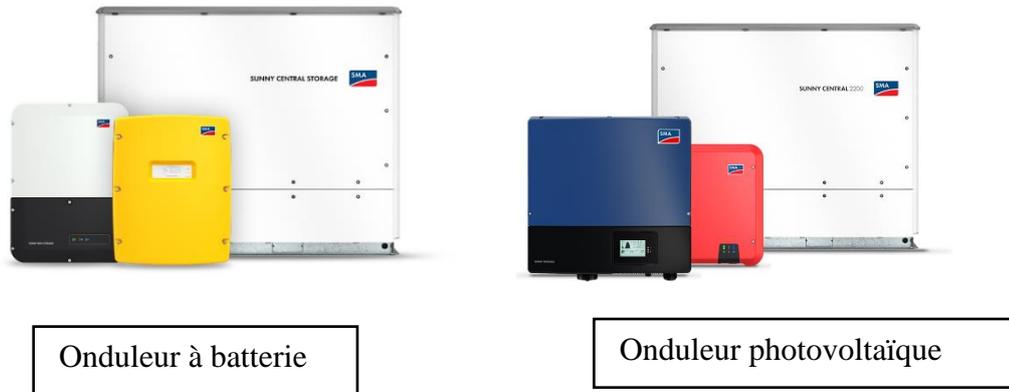


Figure1. 9: Image d'onduleurs photovoltaïques et à batterie. (AG s. d.)

1.2.1.4 Les câbles

Ce sont les éléments qui transportent l'énergie électrique d'un composant vers un autre. Ils doivent être bien dimensionnés. Car un mauvais dimensionnement des câbles peut conduire à des pertes d'énergies non négligeable et par conséquent exposer l'installation à des risques de surchauffe ou même d'incendie.



Figure1. 10: Image de câble de connexion de panneau photovoltaïque. (« Câble pour panneau solaire Solar Câble L=5m/6sqmm MC4-M/F conn. (PV- » s. d.)

1.2.1.5 Entretien des éléments du système photovoltaïque

La durée de vie d'un système photovoltaïque est évaluée entre 15 et 20 ans. Par contre, s'il est mal entretenu, sa durée de vie peut facilement être réduite de moitié. D'où la nécessité d'un bon entretien. Les deux principaux composants qui méritent d'être bien entretenus sont le panneau photovoltaïque et la batterie qui est le « maillon faible » du système.

Concernant les panneaux photovoltaïques, la chute de leurs rendements est souvent provoquée par la poussière qui s'accumule dessus. C'est pourquoi il faut régulièrement les nettoyer. Le nettoyage, nécessite simplement de se servir d'eau et de tissus souples. Ce qui importe est qu'il ne faut pas gratter la superficie des panneaux de manière à éviter le problème de rayures du verre sur sa surface. L'eau de rinçage ne doit presque pas contenir de calcaire car une quantité trop élevée de ces substances a pour effet de produire à la surface une mince couche qui risque de bloquer l'arrivée du rayonnement solaire. (Nicolas 2022) Lors du nettoyage, deux cas de figures peuvent se présenter :

- ☞ Si le champ a été installé sur le sol, le nettoyage peut se faire en utilisant de l'eau déminéralisée, un nettoyant pour vitres et une éponge douce. (« Nettoyage et entretien du système photovoltaïque » 2022)
- ☞ Si le champ a été installé dans un endroit peu accessible comme le toit, les balais à manche télescopique (figure 1.11) sont généralement utilisés pour nettoyer les panneaux. Ce type de balai est capable de rejoindre ces derniers sans monter jusqu'au toit.(Nicolas 2022)



Figure1. 11: Image d'une manche à balais télescopique. (« Manche balais télescopique » s. d.)

En ce qui concerne les batteries, il faut nécessairement un entretien pointu qui s'effectue à plusieurs niveaux dont les principaux sont :

- ☞ Vérifier visuellement l'état général des batteries en regardant s'il n'y a pas des fissures, des gonflements excessifs sur les bacs, des fuites d'électrolyte, des traces de corrosion et de saletés sur les connecteurs et bornes des batteries
- ☞ Essuyer le dessus des batteries avec un chiffon ou du papier absorbant imbibé d'eau. Cet entretien permet d'enlever la poussière qui en se déposant va peu à peu créer un « chemin » entre les bornes positives et négatives. Ce qui va amplifier l'autodécharge de la batterie.

- ☞ Vérifier la tension des batteries pour savoir l'état d'équilibre du pack de stockage. Les mesures de tension sont faites 6h (préférentiellement 24h) après toute charge ou décharge. Ensuite la mesure obtenue est comparée avec les valeurs de tension en fonction de l'état de charge qui sont fournies par le fabricant de votre batterie. Pour des batteries utilisées sur des installations solaires, il est conseillé de faire la mesure à l'aube avant que le soleil ne commence à charger les batteries. Si les tensions ne sont pas équilibrées, il faut procéder à une charge d'égalisation et/ou à une charge individuelle des batteries les plus déchargées.
- ☞ Si les batteries sont montées en série, la mesure de tension peut se faire sans démonter le pack de batteries. Il est conseillé de vérifier la tension des batteries une fois par mois. Pour avoir une charge et une décharge uniforme entre les batteries, l'écart de tension ne doit pas dépasser 0.1V pour les batteries Plomb 12V et 0.05V pour celles Lithium Fer Phosphate.
- ☞ Pour les batteries Plomb montées en parallèle, le lot de batteries est démonté afin de mesurer individuellement les différentes tensions. Il est conseillé de recharger individuellement chaque branche deux fois par an (« Entretien des batteries » s. d.).
- ☞ Mesurer pour les batteries au plomb ouvertes, la densité de l'acide avec un pèse acide (figure 1.12). Ne pas ajouter d'eau avant la mesure, ensuite faire la mesure pour tous les accumulateurs 2V enfin comparer les mesures avec les données fournies par les fabricants (« Entretien des batteries » s. d.).



Figure1. 12: Image d'un pèse acide GEFO CENTRA. (« Pèse acide GEFO CENTRA » s. d.)

1.2.2 Généralité sur les machines thermodynamiques à Cycle Organique de Rankine (ORC)

Les Cycles Organiques de Rankine fonctionnent comme des cycles de centrale à vapeur classique (comme : les centrales nucléaires, au charbon ou à la biomasse). Leur principe de fonctionnement consiste à récupérer l'énergie thermique d'un fluide chaud en le refroidissant

et de convertir une partie de cette celle-ci en énergie mécanique ensuite en électricité à travers un alternateur. (Enertime 2014)

A la différence des cycles classiques qui utilisent l'eau comme fluide de travail, les cycles ORC utilisent les fluides organiques qui, à la même pression, ont une température d'ébullition moins élevée par rapport à l'eau. Cette faible température permet une conception et une régulation plus simple de la chaudière. Le Cycle Organique de Rankine est essentiellement composé de quatre composants que sont : une machine de compression c'est-à-dire une pompe, un condenseur, une machine de détente c'est-à-dire une turbine, une source de chaleur. Ci-dessous, un exemple de cycle ORC.

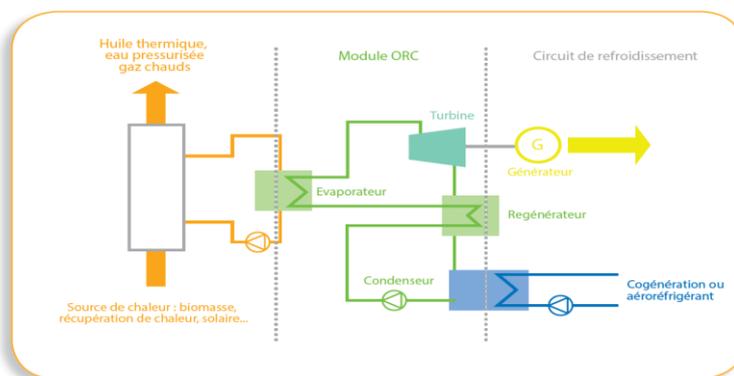


Figure1. 13: Schéma de principe d'un Cycle Organique de Rankine. (Enertime 2014)

1.2.2.1 L'impact environnemental des fluides organiques ou frigorigènes

Pour établir l'impact des fluides organiques sur la couche d'ozone et l'effet de serre, trois indices principaux ont été définis :

- ODP (Ozone Depletion Potential) qui est un indice qui caractérise la participation de la molécule à l'appauvrissement de la couche d'ozone. On calcule la valeur de cet indice par rapport à une molécule de référence, à savoir soit R11 ou R12 qui ont un ODP = 1.
- GWP (Global Warming Potential) qui est un indice qui caractérise la participation de la molécule à l'effet de serre. On calcule la valeur de cet indice par rapport à une molécule de référence, à savoir le CO₂, et pour des durées bien déterminées (20, 100, 500 ans). Le CO₂ à un GWP = 1.
- TEWI (Total Equivalent Warming Impact) qui est un concept permettant de valoriser le réchauffement planétaire (global warming) durant la vie opérationnelle d'un

système de réfrigération par exemple, utilisant un fluide frigorigène déterminé en tenant compte de l'effet direct dû aux émissions de fluide frigorigène et à l'effet indirect dû à l'énergie requise pour faire fonctionner le système. (« Fluides frigorigènes » 2007)

Dans le tableau ci-dessous, nous avons le ODP et le GWP de différents fluides frigorigènes sur 100 ans.

Tableau1. 5 : Impact environnemental de différents fluides organiques ou frigorigènes. (« Fluides frigorigènes » 2007)

		ODP	GWP₁₀₀
R717	Ammoniac	0	0
R744	CO ₂	0	1
R290	Propane	0	20
R32	HFC, fluide pur	0	675
R134a	HFC, fluide pur	0	1 430
R407C	HFC, mélange	0	1 800
R22	HCFC	0,05	1 810
R410A	HFC, mélange	0	2 100
R427A	HFC, mélange	0	2 100
R417A	HFC, mélange	0	2 300
R422D	HFC, mélange	0	2 700
R125	HFC, mélange	0	3 500
R404A	HFC, mélange	0	3 900
R12	CFC	0,82	10 900

D'après les données fournies dans ce tableau, nous pouvons dire que le R290, le R717, le R744, le R32, R134a et le R407C bien qu'ayant un impact négatif sur l'environnement, sont très peu polluants comparé aux anciens fluides comme le R12. Il existe également des fluides organiques peu nocifs pour la couche d'Ozone, les HFO (hydrofluoroléfine) qui ont de très faibles GWP (Global Warming Potential). C'est à l'image du HFO1234ze (GWP = 7), le HFO1233zd (GWP = 4,5), et le HFO1234yf (GWP = 4).(Array 2020)

1.2.2.2 Présentation de la source de chaleur du Cycle Organique de Rankine

La source de chaleur est souvent une chaudière qui peut être alimentée par la combustion de biomasses ou bien un champ solaire à concentration. Les capteurs solaires thermiques à concentration peuvent être classés en deux catégories que sont :

- ☞ Les concentrateurs linéaires qui focalisent les rayons solaires sur une ligne où sont placés les tubes absorbeurs contenant le fluide caloporteur. Ils sont utilisés par les centrales à miroirs cylindro-paraboliques et les centrales à miroirs linéaires de Fresnel.
- ☞ Les concentrateurs ponctuels concentrent les rayons solaires sur un point appelé point focal. Ils sont utilisés dans les centrales à tour et les centrales paraboliques.

Ci-dessous, un résumé des quatre types de capteurs solaires thermiques à concentration.

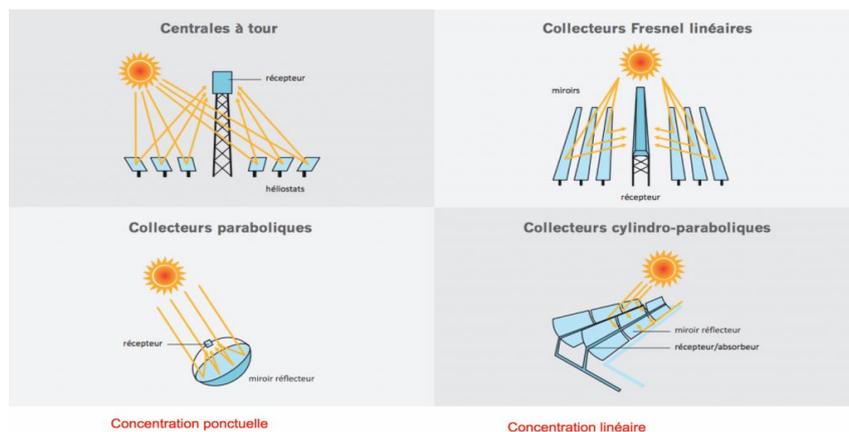


Figure1. 14: Image des quatre types de capteurs solaires thermiques à concentration. (Todoroff 2018)

Comme on peut le constater dans le tableau 1.6, les technologies à concentration (CSP) diffèrent au niveau de plusieurs aspects comme le rapport de concentration, la température de travail et

le rendement de conversion. Ces données permettent de faire un choix de la technologie en fonction de ce que l'on veut faire.

Tableau1. 6: Comparaison des différentes technologies de concentrations. (Thiam 2022)

Technologies CSP	Concentrateurs cylindro-paraboliques	Réflecteurs linéaires de Fresnel	Tour solaire	Concentrateur parabolique
Concentration	linéaire	linéaire	ponctuelle	ponctuelle
Rapport de concentration	70-80	>60	>1000	>1300
Températures de travail	250-450°C	150-350°C	300-1500°C	200-1200°C
Rendement de conversion	70%	50-60%	73%	75%

Les réflecteurs linéaires de Fresnel ont un plus faible rendement de conversion par rapport aux autres. Ceci peut s'expliquer par le fait que la surface occupée par les miroirs est plus petite pour cette technologie. Mais si les surfaces étaient les mêmes, on aurait à peu près le même rendement de conversion.

En plus de ces technologies à concentration, de nouveau type de panneaux combinant l'aspect photovoltaïque et thermodynamique sont en train d'être développés. C'est le cas des capteurs photovoltaïques à concentration (CPV) qui allient les deux effets.



Figure1. 15: Un concentrateur photovoltaïque cylindro-parabolique sur tracker un axe. (Weick 2017)

A l'issu de la présentation des villages de Diongol et de Ngoniam, nous avons pu voir que la population de ces deux sites vit presque exclusivement d'activités agricoles. Près de la moitié des ménages a des revenus mensuels faibles. Mais cela n'empêche qu'ils sont prêts à faire des dépenses énergétiques moyennes proposées en paiement mensuel en cas de branchement même si celles-ci sont supérieures à leurs dépenses habituelles. Nous avons pu voir également que sur le plan de l'ensoleillement, les deux villages sont dans de très bonne disposition pour arbitrer une centrale hybride autonome ayant subi une véritable progression dans le temps.

2 CHAPITRE II : METHODES ET MATERIELS

Pour pouvoir étudier l'électrification des deux villages, différentes méthodes et matériels vont être utilisés pour mener à bien ce travail. Avant cela, une connaissance des sujets de cette étude s'impose.

2.1 Les sujets

Comme présenté dans le chapitre 1, la zone d'étude est composée des villages de Diongol et de Ngoniam situé dans la région de Ziguinchor, dans le département de Bignona et plus précisément dans la commune Suelle. Le choix de ces deux villages est dicté par le fait qu'ils sont éloignés du réseau de la Senelec. Car Diongol et Ngoniam se trouvent respectivement à 32 et 35 km du réseau électrique. Ce qui rend difficile leur raccordement. En plus de cela, l'Agence Sénégalaise d'Electrification Rurale (ASER) assure que les deux villages n'ont pas été sélectionnés pour bénéficier du projet étatique d'électrification rurale en cours jusqu'en 2025.(AGIR 2018) La confirmation de la non sélection de ces villages a permis à l'association Kassoumaï⁷⁸ et au cabinet AGIR de valider ce choix.

En 2019, une enquête réalisée auprès des chefs des deux villages a révélé que Diongol compte 33 ménages et Ngoniam 35 ménages. Les villages sont dispersés le long des vallées, l'habitat est tout aussi dispersé mais avec des regroupements par concessions (figure 2.1) basés sur des liens familiaux. La distance moyenne entre les concessions est d'environ 20 à 35 mètres. La taille moyenne d'un ménage est de 10 personnes, un taux qui s'explique par le régime polygame de la majorité des chefs de famille (la moyenne est de 02 épouses). Pour cette raison, les habitations sont souvent assez grandes et le nombre moyen de pièces par maison varie entre 05 et 15. (AGIR 2018)



Figure2. 1: Image d'un type d'habitat par concession. (AGIR 2018)

En se basant sur le registre d'habitation tenu par les chefs de villages, en 2017, le nombre de résidents serait de 264 habitants à Diongol et 216 habitants à Ngoniam. (AGIR 2018)

Sur le plan des infrastructures, on peut recenser :

- ☞ Une (01) école à 03 classes et 01 case de santé à Diongol ;
- ☞ Un (01) foyer des jeunes en abri provisoire dans chaque village ;
- ☞ Deux (02) petites mosquées dont une dans chaque village et une église (Diongol) ;
- ☞ Une (01) unité de transformation de céréales dans chaque village ;
- ☞ Un (01) bloc maraîcher dans chaque village. (AGIR 2018)

2.2 La méthodologie

Dans ce travail qui consiste à étudier la possibilité de remplacer le groupe électrogène par une machine thermodynamique. Cette étude est scindée en deux étapes :

- ☞ D'abord une étude technique permettant de voir si la machine thermodynamique fonctionnera de manière optimale dans les conditions climatiques quasi identiques des deux villages est faites.
- ☞ Ensuite nous présentons une étude financière pour voir si le remplacement du groupe électrogène ou des batteries par une machine thermodynamique aura un intérêt économique ou non.

2.2.1 Déroulement de l'étude technique

Faire l'étude technique de la machine thermodynamique revient à étudier son comportement lors de la variation de paramètres comme la pression d'entrée et de sortie de la pompe, la température de surchauffe, le type de fluides et les rendements de la pompe et de la turbine. Pour se faire, avec le logiciel Thermoptim, un cycle à vapeur simple est tracé (figure 2.2). Ensuite en fonction des paramètres d'entrée, on regarde l'évolution de la chaleur à fournir au fluide, de la puissance consommée par la pompe, de la puissance fournie par la turbine, de la température d'évaporation, du rendement thermique et exergetique. L'étude paramétrique s'effectue en six étapes :

- ☞ Dans la première étape, le R245fa qui est un composé hydrofluorocarbure (HFC) (climalife 2022) est pris comme fluide de travail. La pression à l'entrée de la pompe est fixée à 0,15 bar, les rendements de la pompe et de la turbine sont maintenus égaux à 1 et la température de surchauffe est fixée à 350°C. Les évolutions du rendement

thermique et exergetique sont tracées en faisant varier la pression de sortie de la pompe de 12 à 35 bars.

- ☞ Dans la deuxième étape, pour chacun des fluides de travail comme le R407c, le R245fa, le R11, le R134a et l'eau, les rendements thermique et exergetique sont calculés. Lors de cette étude, la pression à l'entrée de la pompe est fixée à 0,15 bar, la pression de sortie à 25 bars, les rendements de la pompe et de la turbine à 1 et la température de surchauffe à 350°C.
- ☞ Dans la troisième étape, les évolutions du rendement thermique et exergetique sont tracées en faisant varier la température de surchauffe de 300°C à 500°C. Lors de cette étude, la pression à l'entrée de la pompe est fixée à 0,1233 bar, la pression de sortie à 25 bars, le rendement de la pompe à 0,7 ; celui de la turbine à 0,8 et l'eau est prise comme fluide de travail.
- ☞ Dans la quatrième étape, les évolutions du rendement thermique et exergetique sont tracées en faisant varier la pression à l'entrée de la pompe de 0,12 à 1 bar. Lors de cette étude, la pression à la sortie de la pompe est fixée à 25 bars, le rendement de la pompe à 0,7 ; celui de la turbine à 0,8 et l'eau est prise comme fluide de travail.
- ☞ Dans la cinquième étape, les évolutions du rendement thermique et exergetique sont tracées en faisant varier le rendement de la pompe de 0,6 à 1. Lors de cette étude, la pression à la sortie de la pompe est fixée à 25 bars, la pression d'entrée à 0,12 bar le rendement de la turbine à 0,8, la température de surchauffe à 350°C et l'eau est prise comme fluide de travail.
- ☞ Dans la sixième étape, les évolutions du rendement thermique et exergetique sont tracées en faisant varier le rendement de la turbine de 0,6 à 1. Lors de cette étude, la pression à la sortie de la pompe est fixée à 25 bars, la pression d'entrée à 0,12 bar, la température de surchauffe à 350°C, le rendement de la pompe à 0,7 et l'eau est prise comme fluide de travail.

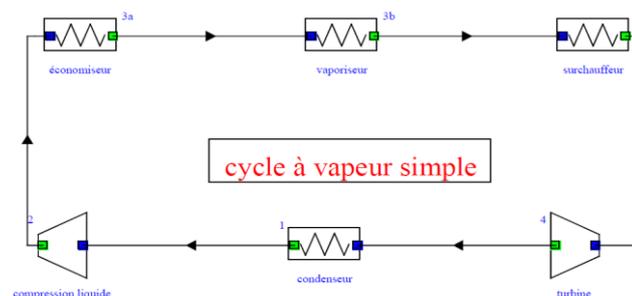


Figure2. 2: Représentation d'un cycle à vapeur simple avec le logiciel ThermoOptim

2.2.2 Déroulement de l'étude financière

L'étude financière se base sur les coûts des différents composants du système hybride fournis par le business plan réalisé par l'Association Kassoumaï78. Le type et le nombre des composants de la centrale sont obtenus grâce au dimensionnement du système hybride réalisé avec le logiciel Sunny Design. Les besoins énergétiques des deux villages obtenus de l'enquête réalisée auprès de la population de ces derniers par le cabinet AGIR a servis de base pour le dimensionnement (voir annexe). Concernant l'étude financière, il existe deux cas que sont :

- ☞ Dans le premier cas, le système d'appoint qui est dans ce cas un groupe électrogène est utilisé au maximum deux (2) heures par jour. Dans ce cas, c'est le système photovoltaïque qui fournit l'essentiel de l'énergie de l'installation. Nous faisons le dimensionnement du système photovoltaïque et en se basant sur le business plan, nous faisons une estimation du coût d'investissement de la centrale hybride composée d'un système photovoltaïque avec stockage et d'un groupe électrogène.
- ☞ Dans le second cas, le groupe électrogène est remplacé par une machine thermodynamique utilisant le solaire thermodynamique pour la production de chaleur. Contrairement au groupe électrogène, la machine thermodynamique est utilisée minimum huit (8) heures par jour. Après ce remplacement, les impacts sur le nombre total de panneaux utilisés et sur le coût d'investissement sont étudiés et les résultats obtenus sont comparés à ceux du premier cas.

2.3 Analyse des données

Afin de réaliser l'étude paramétrique et financière, différentes formules et logiciels sont utilisés.

2.3.1 Présentation du logiciel et des formules utilisées pour effectuer l'étude paramétrique.

Lors de chaque étape de l'étude paramétrique, des rendements thermique et exergetique sont à chaque fois calculés. Afin d'effectuer ces calculs, les formules suivantes ont été utilisées :

- ☞ Pour le calcul du rendement thermique :

$$\eta_{thermique} = \frac{W_{net}}{Q_{payante}} \times 100 \quad (2.1)$$

Avec :

$$W_{net} = |W_{turbine}| - W_{pompe} \quad (2.2)$$

$\eta_{\text{thermique}}$: rendement thermique du cycle à vapeur simple, il s'exprime en pourcentage (%)

W_{net} : la puissance effectivement fournie par le système. Elle s'exprime en kilowatt (kW)

W_{turbine} : la puissance fournie par la turbine. Elle s'exprime en kilowatt (kW)

W_{pompe} : la puissance consommée par la pompe. Elle s'exprime en kilowatt (kW)

Q_{payante} : la chaleur qu'il faut fournir au fluide pour le porter à la température de saturation (à laquelle on a une vapeur sèche). Elle s'exprime en kilowatt (kW)

☞ Pour le calcul du rendement exergetique :

$$\eta_{\text{exergetique}} = \frac{T_{\text{évaporation}} \times W_{\text{net}}}{(T_{\text{évaporation}} - T_{\text{ambiante}}) \times Q_{\text{payante}}} \times 100 \quad (2.3)$$

Avec :

$\eta_{\text{exergetique}}$: le rendement exergetique qui est une grandeur permettant de calculer le rendement d'un processus en prenant en compte la deuxième loi de la thermodynamique. En pratique, le rendement énergétique d'un système calorifique est toujours inférieur à son rendement exergetique.

$T_{\text{évaporation}}$: la température d'évaporation du fluide à la pression de sortie de la pompe. Elle s'exprime en degré Celsius (°C)

T_{ambiante} : la température du milieu extérieur qui est fixée pour notre cas à 35°C.

Concernant le logiciel utilisé pour l'étude paramétrique, c'est le logiciel Thermoptim. Ce dernier, dont le logo est présenté dans la figure 2.3, est un logiciel qui permet de représenter de manière simple différents systèmes énergétiques. Avec sa bibliothèque de fluides et de composants très variés, différents types de transformations peuvent être réalisés comme :

- ☞ Des compressions et des détente (système ouvert ou fermé ; adiabatiques ou polytropiques ; rendement isentropique ou polytropique).
- ☞ Des combustions, elles aussi en système ouvert ou fermé, à pression imposée, volume imposé ou température constante.
- ☞ Des laminages isenthalpiques.

A l'issue de ces transformations, ThermoOptim donne directement l'état complet des différents fluides c'est-à-dire leurs températures, pressions, enthalpies, énergies internes, entropies, titres etc... (« ThermoOptim » s. d.)

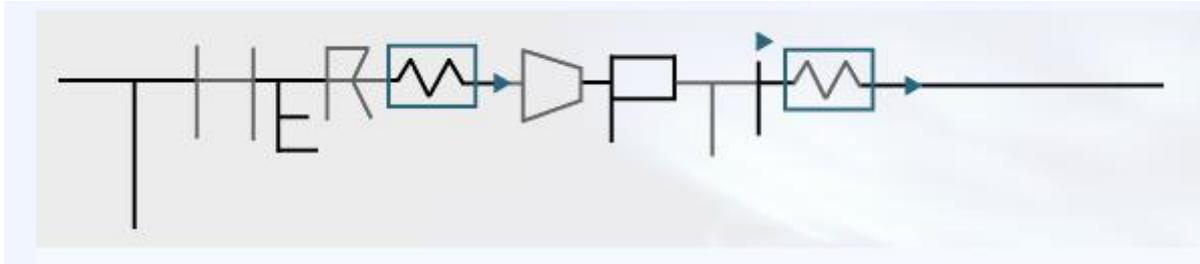


Figure2. 3: Logo du logiciel ThermoOptim (« Bienvenue sur le site de S4E2 » s. d.)

2.3.2 Présentation du logiciel et des formules utilisées pour réaliser l'étude financière.

L'étude financière n'est possible qu'après le dimensionnement de la centrale hybride utilisée pour l'électrification. Pour réaliser ce dimensionnement, c'est le logiciel Sunny Design qui est utilisé. Ce logiciel, dont le logo est présenté dans la figure 2.4, permet de planifier des installations photovoltaïques adaptées aux circonstances du site. « Qu'il s'agisse d'un système PV connecté au réseau avec ou sans système de stockage par batterie, d'une gestion intelligente de l'énergie ou de l'e-mobilité, d'un îlot hors réseau ou d'un système hybride - Sunny Design prend en compte toutes les spécifications techniques des différents composants et vous fournit avec des données pertinentes pour une évaluation rentable du système. » (AG s. d.)



Figure2. 4: Logo du logiciel Sunny Design

Avec Sunny Design, pour pouvoir dimensionner le système hybride, l'utilisateur fournit les besoins énergétiques des deux villages, la puissance crête de la centrale et la capacité du pack de batteries. Pour calculer ces différents paramètres, les formules suivantes sont utilisées :

☞ Pour le calcul des besoins énergétiques :

$$E_j = \sum_{i=1}^N P_i \times t_i \quad (2.4)$$

Avec :

E_j : la consommation énergétique journalière de l'installation, elle s'exprime en watt heure par jour (kWh/j)

P_i = la puissance de chaque appareil, elle s'exprime en kilo watt (kW)

t_i = le temps d'utilisation par jour de chaque appareil, il s'exprime en heure par jour (heure/j)

☞ Pour le calcul de la puissance crête qui permet le dimensionnement du champ PV :

$$P_c = \frac{E_j \times G_n}{k \times E_i} \quad (2.5)$$

Avec :

P_c : la puissance crête du champ solaire, elle s'exprime en Watt crête (Wc)

E_i : l'ensoleillement journalier du lieu choisi. Il s'exprime en kilowatt heure par mètre carré par jour (kWh/m²/j). Pour notre cas, en se basant sur les données fournies par le **tableau 1.1**, nous prenons l'ensoleillement du mois le moins ensoleillé qui est celui du mois d'Aout, c'est-à-dire E_i = 5,08 kWh/m²/j

k : le rendement global du système, qui est fixé pour notre cas à 0,7

G_n : Rayonnement incident pour lequel la puissance nominale des modules est donnée.

Il est égal à 1000W/m²

☞ Pour le calcul du nombre de panneaux :

$$N_p = \frac{P_c}{P_p} \quad (2.6)$$

Avec :

N_p : le nombre total de panneaux

P_p : la puissance crête d'un panneau

☞ Pour le calcul de la capacité totale de batteries :

$$Q = \frac{N_j \times E_j}{V_{syst} \times D_p \times R_t \times \eta_{ON} \times \eta_{LAA}} \quad (2.7)$$

Avec :

Q : Capacité du pack de batterie, exprimée en Ah

N_j : Nombre de jour d'autonomie

V_{syst} : Tension du système

D_p : Profondeur de décharge

R_t : Coefficient réducteur de capacité de la batterie sous l'effet de la température, donné par le fabricant. R_t=1 en général.

η_{ON} : Rendement de l'onduleur décrivant ses pertes de transformation. Il est fixé à 96% pour notre cas.

η_{LAA} : Rendement des lignes de transmission concernées décrivant les pertes de transmission dans les lignes électriques de l'accumulateur vers l'appareil. Il est fixé pour notre cas à 97%.

☞ Pour le calcul du nombre de batterie en séries :

$$N_{bs} = \frac{V_{syst}}{V_b} \quad (2.8)$$

Avec :

N_{bs} : Nombre de batteries en séries

V_b : Tension d'une batterie, exprimé en volt.

☞ Pour le calcul du nombre de lignes de batteries :

$$N_{bp} = \frac{Q}{Q_b} \quad (2.9)$$

Avec :

N_{bp} : Nombre de lignes de batteries

Q_b : Capacité d'une batterie exprimée en Ah

☞ Pour le calcul du nombre total de batteries :

$$N_b = N_{bp} \times N_{bs} \quad (2.10)$$

Avec :

N_b : Nombre total de batteries

☞ Pour le calcul du taux d'amortissement du cout d'investissement :

$$\text{Taux d'amortissement}(\%) = \frac{1}{\text{Durée de vie}} \times 100 \quad (2.11)$$

Avec :

Taux d'amortissement : Un pourcentage permettant de connaître l'amortissement annuel du cout d'investissement. Il s'exprime en (%) ou en an⁻¹.

Durée de vie : La durée maximale qu'un matériel peut fonctionner normalement dans des conditions optimales. Elle s'exprime en année (ans).

☞ Pour le calcul de l'annuité du cout d'investissement :

$$\mathbf{Annuité (FCFA/an) = Taux d'amortissement \times Prix total} \quad (2.12)$$

Avec :

Annuité : La répartition annuelle du cout d'investissement. Elle s'exprime en F CFA/an.

Prix total : Cout d'investissement d'un matériel donné. Il s'exprime en F CFA.

En bref, pour étudier l'électrification de 68 ménages, une école, un foyer, deux mosquées, une unité de transformation et un bloc maraicher, nous avons eu à utiliser différentes formules, méthodes et deux logiciels que sont Thermoptim et Sunny Design dont le premier pour l'étude technique et le second pour l'étude financière.

3 CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Dans cette partie, les résultats issus de l'étude paramétrique et de l'étude financière y sont présentés. Le but final de l'étude paramétrique est de fournir des données permettant de voir les performances de la machine thermodynamique dans les conditions climatiques des deux villages. Quant à l'étude financière, elle donne les données économiques qui permettent d'apprécier l'intérêt de l'utilisation de machine thermodynamique sur le plan financier.

3.1 Résultats de l'étude technique ou paramétrique

Les résultats ci-dessous proviennent de l'étude de la machine thermodynamique en fonction de la variation de la pression de sortie de la pompe, du fluide de travail, de la température de surchauffe, de la pression d'entrée de la pompe, du rendement de la pompe et de la turbine. Ces résultats sont énumérés dans les **tableaux 3.1 à 3.6** et dans les **figures 3.1 à 3.12**.

Dans le **tableau 3.1**, sont affichés les résultats des variations des paramètres de la machine thermodynamique comme la chaleur à fournir au fluide, les travaux de la pompe et de la turbine, les rendements thermique et exergetique en fonction de l'augmentation de la pression de sortie de la pompe. Dans les **figures 3.1 et 3.2** sont affichées les courbes de variations des rendements thermique et exergetique en fonction de la pression de sortie de la pompe. Tandis que dans le **tableau 3.2**, sont affichés les résultats des variations paramétriques de la machine en fonction du fluide de travail. Dans les **figures 3.3 et 3.4** sont affichées les différentes valeurs des rendements thermique et exergetique en fonction des fluides de travail choisis.

Concernant respectivement les **tableaux 3.3 et 3.4**, ce sont les résultats des variations des paramètres précités de la machine thermodynamique qui sont affichés respectivement en fonction de l'augmentation de la température de surchauffe et de l'augmentation de la pression d'entrée de la pompe. Pour les **figures 3.5 et 3.6**, ce sont les variations des rendements thermique et exergetique en fonction de la température de surchauffe qui y sont affichées et pour les **figures 3.7 et 3.8** ce sont les variations des mêmes rendements qui y sont affichées en fonction de la pression d'entrée de la pompe.

Enfin au niveau des **tableaux 3.5 et 3.6**, ce sont les résultats des variations des paramètres de la machine thermodynamique qui sont affichées respectivement en fonction de l'augmentation du rendement de la pompe et celle de la turbine. Pour les **figures 3.9, 3.10, 3.11 et 3.12**, ce sont les variations des rendements thermique et exergetique qui y sont affichées en fonction du rendement de la pompe pour les deux premiers et celui de la turbine pour les deux derniers.

Etude paramétrique en fonction de la pression de sortie de la pompe

AVEC : Pression d'entrée = 0,15 bar, Rendement de la pompe = Rendement de la turbine = 1, Température de surchauffe = 350°C et le fluide : R245fa

Tableau3. 1: Évolution de la machine thermodynamique en fonction de la pression de sortie de la pompe.

Haute Pression (Pa)	Q _{payante} (kW)	W _{turbine} (kW)	W _{pompe} (kW)	W _{net} (kW)	T _{évaporation} (°C)	Rendement thermique (%)	Rendement exergetique (%)
12	625,81	-148,02	0,642	147,37	97,76	23,55	36,68
15	624,62	-153,97	0,804	153,16	107,97	24,52	36,28
20	622,57	-161,47	1,07	160,4	121,98	25,76	36,13
25	620,44	-166,54	1,34	165,2	133,52	26,63	36,09
30	618,22	-170,34	1,61	168,73	143,41	27,29	36,10
35	615,87	-173,42	1,88	171,54	152,08	27,85	36,18

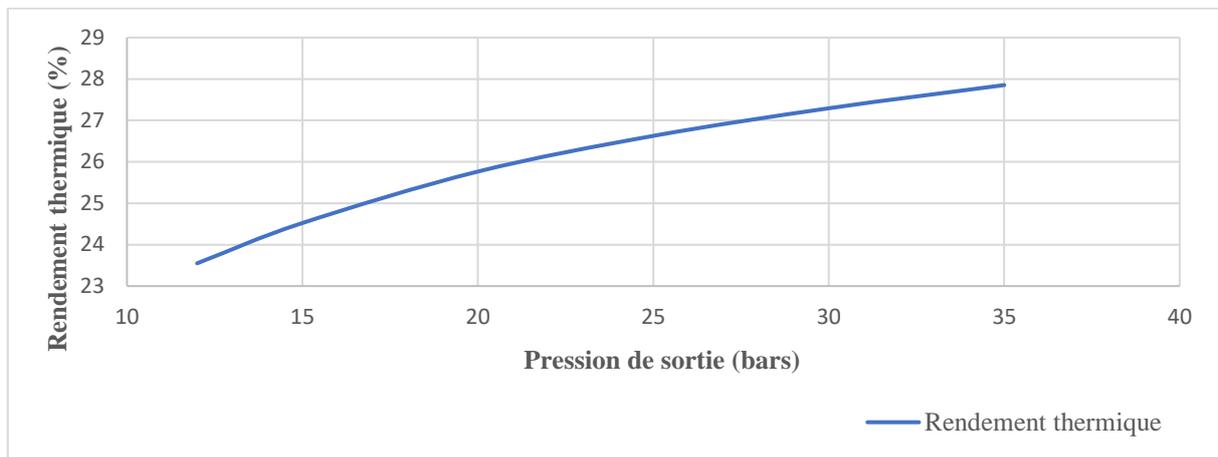


Figure3. 1: Evolution du rendement thermique en fonction de la pression de sortie de la pompe

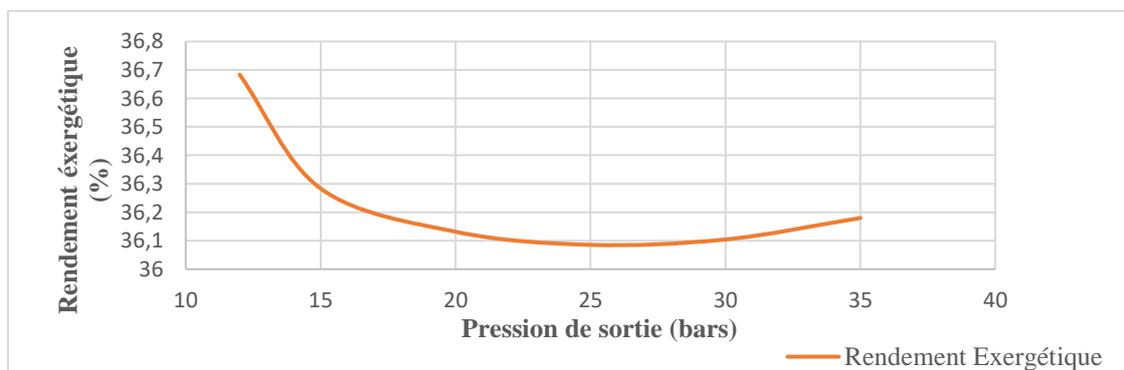


Figure3. 2: Evolution du rendement exergetique en fonction de la pression de sortie de la pompe

Etude paramétrique en fonction des fluides de travail

AVEC : Pression d'entrée = 0,15 bar ; Pression de sortie = 25 bars ; Rendement de la pompe = Rendement de la turbine = 1 ; Température de surchauffe = 350°C

Tableau3. 2: Évolution de la machine thermodynamique en fonction des fluides de travail.

Fluides	Q _{payante} (kW)	W _{turbine} (kW)	W _{pompe} (kW)	W _{net} (kW)	T _{évaporation} (°C)	Rendement thermique (%)	Rendement exergetique (%)
R245fa	620,44	-166,54	1,34	165,2	133,52	26,63	36,09
R407c	679,53	-245,12	1,33	243,79	55,46	35,88	97,25
R134a	649,95	-214,24	1,35	212,89	77,52	32,75	59,72
R11	425,56	-149,45	1,2	148,25	160,21	34,84	44,57
Eau	2900,03	-910,15	2,2	907,95	223,94	31,31	37,11

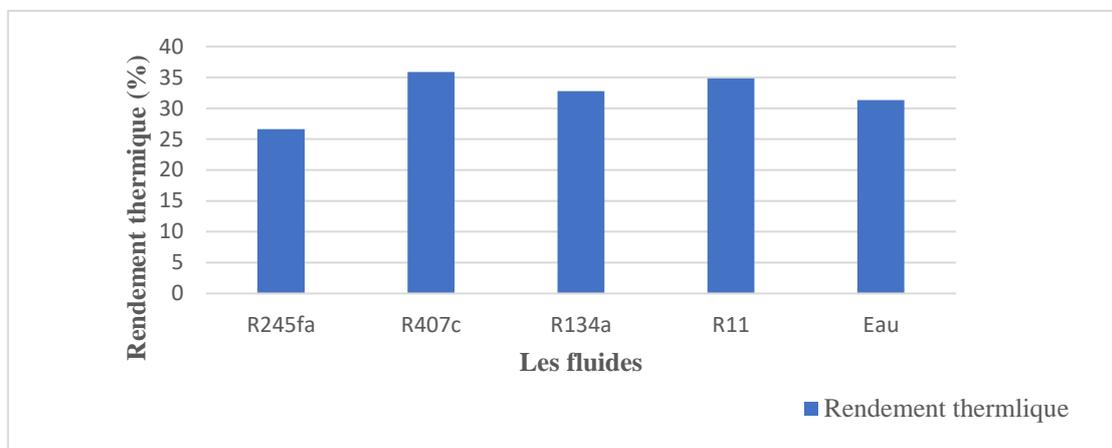


Figure3. 3: Evolution du rendement thermique en fonction des fluides de travail



Figure3. 4: Evolution du rendement exergetique en fonction des fluides de travail

Etude paramétrique en fonction de la température de surchauffe

AVEC : Pression de sortie = 25 bars ; Pression d'entrée = 0,1233 bar ; Rendement de la Pompe = 0,7 ; Rendement de la Turbine = 0,8 et l'Eau est prise comme fluide travail

Tableau3. 3: Évolution de la machine thermodynamique en fonction de la température de surchauffe.

Température de surchauffe (°C)	Q_{payante} (kW)	W_{turbine} (kW)	W_{pompe} (kW)	W_{net} (kW)	$T_{\text{évaporation}}$ (°C)	Rendement thermique (%)	Rendement exergetique (%)
300	2797,55	-704,4	3,59	700,81	223,94	25,05	29,69
350	2915,35	-747,67	3,59	744,08	223,94	25,52	30,25
400	3027,76	-792,73	3,59	789,14	223,94	26,06	30,89
450	3138,36	-840,23	3,59	836,64	223,94	26,66	31,60
500	3248,82	-890,42	3,59	886,83	223,94	27,30	32,35

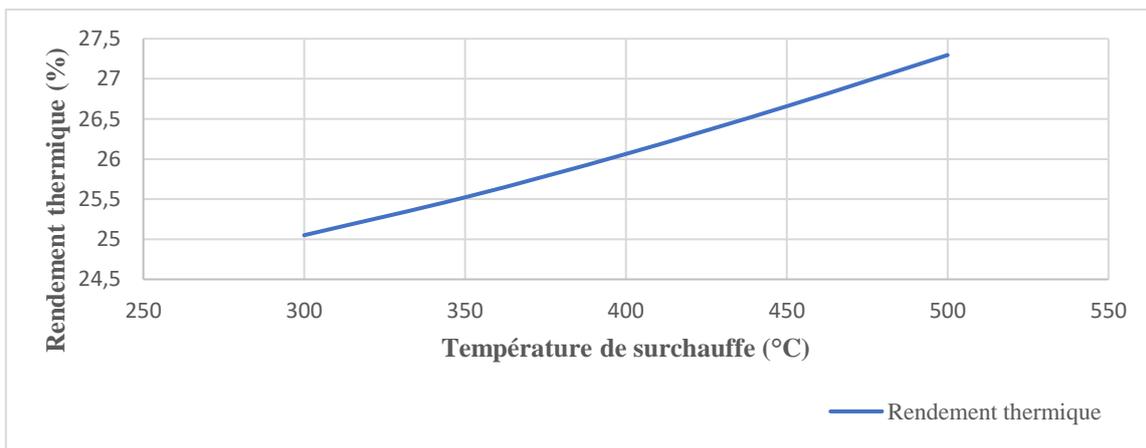


Figure3. 5: Evolution du rendement thermique en fonction de la température de de surchauffe

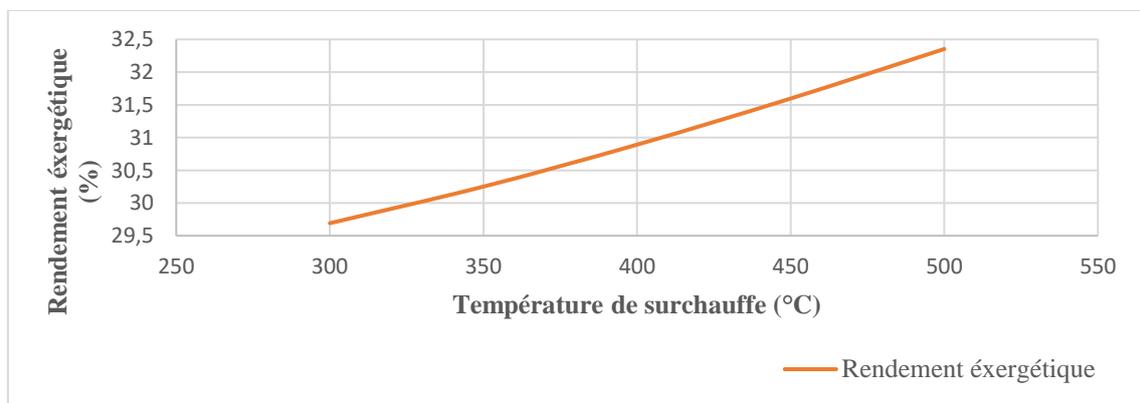


Figure3. 6: Evolution du rendement exergetique en fonction de la température de de surchauffe

Etude paramétrique en fonction de la pression d'entrée de la pompe

AVEC : Pression de sortie = 25 bars ; Température de surchauffe = 350°C ; Rendement de la Pompe = 0,7 ; Rendement de la Turbine = 0,8 et l'Eau est prise comme fluide de travail

Tableau3. 4: Évolution de la machine thermodynamique en fonction de la pression d'entrée de la pompe.

Pression d'entrée (bar)	Q _{payante} (kW)	W _{turbine} (kW)	W _{pompe} (kW)	W _{net} (kW)	T _{évaporation} (°C)	Rendement thermique (%)	Rendement exergetique (%)
0,12	2915,35	-747,67	3,59	744,08	223,94	25,52	30,25
0,25	2852,61	-675,18	3,6	671,58	223,94	23,54	27,90
0,5	2784,04	-598,62	3,6	595,02	223,94	21,37	25,33
0,75	2740,16	-551,07	3,59	547,48	223,94	19,98	23,68
1	2707,12	-515,98	3,58	512,4	223,94	18,93	22,43

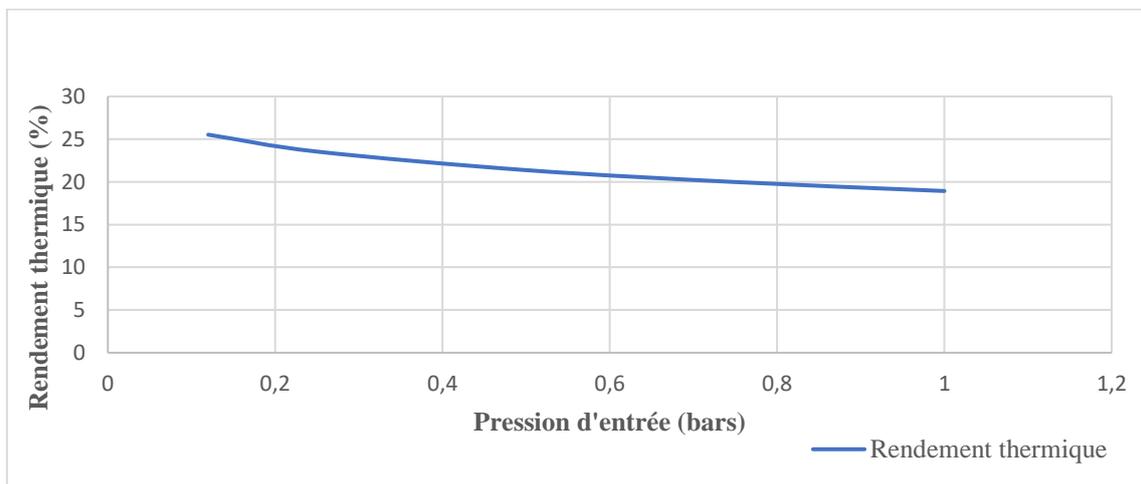


Figure3. 7: Evolution du rendement thermique en fonction de la pression d'entrée de la pompe

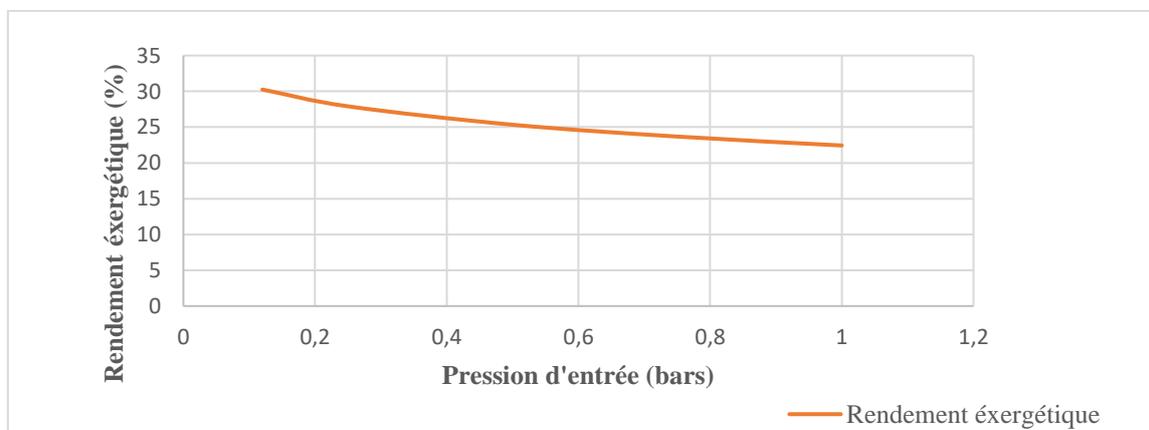


Figure3. 8: Evolution du rendement exergetique en fonction de la pression d'entrée de la pompe

Etude paramétrique en fonction du rendement de la pompe

AVEC : Pression de sortie = 25 bars ; Température de surchauffe = 350°C ; Pression d'entrée = 0,12 bar ; Rendement de la Turbine = 0,8 et l'Eau est prise comme fluide de travail

Tableau3. 5: Évolution de la machine thermodynamique en fonction de la pression d'entrée de la pompe.

Rendement Pompe	Q_{payante} (kW)	W_{turbine} (kW)	W_{pompe} (kW)	W_{net} (kW)	$T_{\text{évaporation}}$ (°C)	Rendement thermique (%)	Rendement exergetique (%)
0,6	2914,75	-747,67	4,19	743,48	223,94	25,51	30,23
0,7	2914,75	-747,67	3,59	744,08	223,94	25,53	30,26
0,8	2915,8	-747,67	3,15	744,52	223,94	25,53	30,26
0,9	2916,15	-747,67	2,8	744,87	223,94	25,54	30,27
1	2916,43	-747,67	2,52	745,15	223,94	25,55	30,28

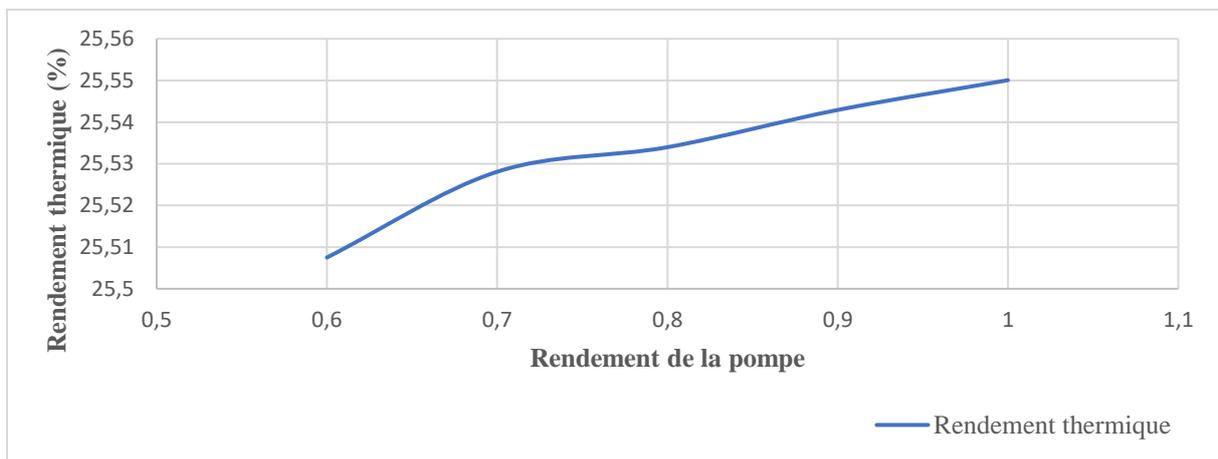


Figure3. 9: Evolution du rendement thermique en fonction du rendement de la pompe

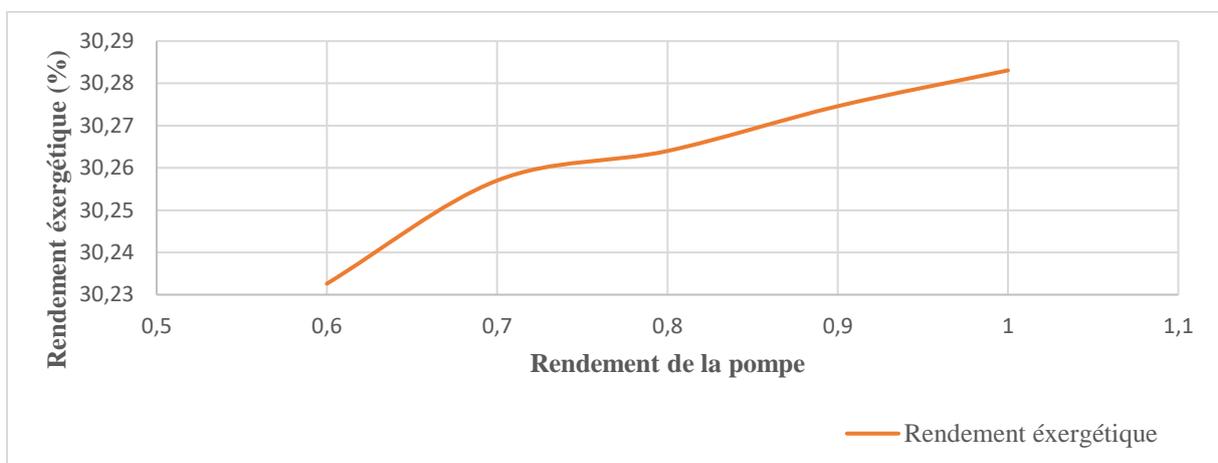


Figure3. 10: Evolution du rendement exergetique en fonction du rendement de la pompe

Etude paramétrique en fonction du rendement de la turbine

AVEC Pression de sortie = 25 bars ; Température de surchauffe = 350°C ; Pression d'entrée = 0,12 bar ; Rendement de la Pompe = 0,7 et l'Eau est prise comme fluide de travail

Tableau3. 6: Evolution de la machine thermodynamique en fonction du rendement de la pompe

Rendement Turbine	Q _{payante} (kW)	W _{turbine} (kW)	W _{pompe} (kW)	W _{net} (kW)	T _{évaporation} (°C)	Rendement thermique (%)	Rendement exergetique (%)
0,6	2915,35	-560,75	3,59	557,16	223,94	19,11	22,65
0,7	2915,35	-654,21	3,59	650,62	223,94	22,32	26,45
0,8	2915,35	-747,67	3,59	744,08	223,94	25,52	30,25
0,9	2915,35	-841,13	3,59	837,54	223,94	28,73	34,05
1	2915,35	-934,59	3,59	931	223,94	31,93	37,85

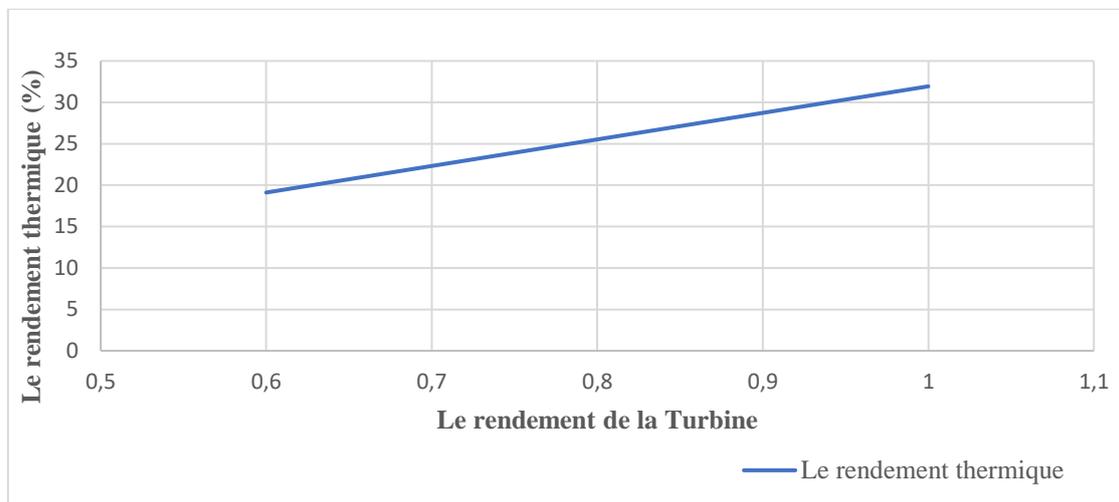


Figure3. 11: Evolution du rendement thermique en fonction du rendement de la turbine

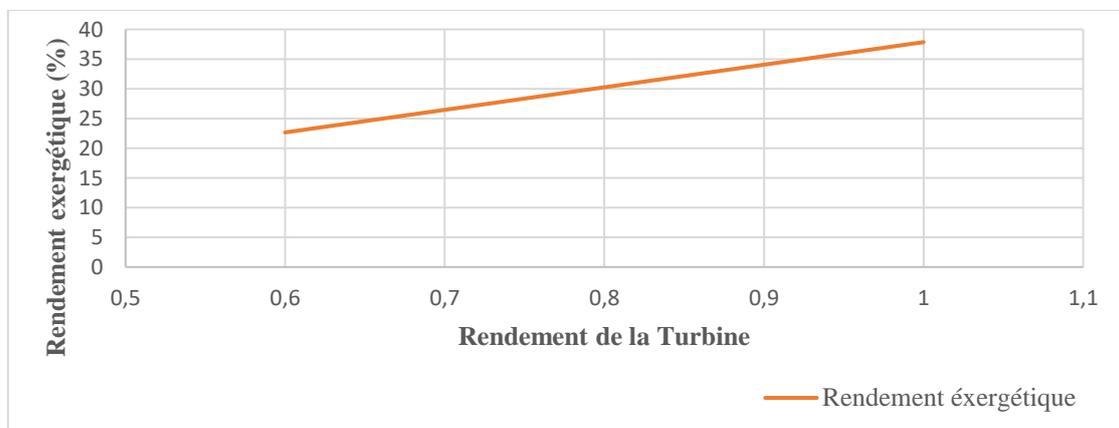


Figure3. 12: Evolution du rendement exergetique en fonction du rendement de la turbine

L'analyse des résultats ci-dessus, montre que pour les **figures 3.5, 3.6, 3.11 et 3.12**, les rendements thermique et exergetique augmentent respectivement en fonction de la température de surchauffe et de la turbine. Ceci est dû à plusieurs facteurs. Pour les **figures 3.5, 3.6, 3.11 et 3.12** la puissance fournie par la turbine augmente avec l'augmentation du rendement de cette dernière et de la température de surchauffe alors que la puissance consommée par la pompe et la température d'évaporation restent constant. Pour les **figures 3.9 et 3.10**, les rendements thermique et exergetique n'évoluent presque pas en fonction de l'augmentation du rendement de la pompe. Ceci montre que le choix de la pompe contrairement à celui de la turbine influe peut sur les rendements thermique et exergetique.

Par contre, pour les **figures 3.7 et 3.8**, les rendements thermique et exergetique diminuent quand la pression d'entrée de la pompe augmente. Ceci est essentiellement causé par une diminution du facteur de compression et par conséquent de la puissance fourni par la turbine.

Le **Tableau 3.2** montre que pour la production de vapeur, l'eau nécessite au moins quatre fois plus d'apport de chaleur par rapport aux autres fluides comme le **R245fa** ou le **R407c**. Ce qui nous renseigne sur la taille de la chaudière. Concernant le rendement thermique, la **figure 3.3** montre que les fluides **R407c** et **R11** ont les meilleures efficacités. La **figure 3.4** montre également que le fluide **R407c** a un meilleur rendement exergetique du fait de sa température d'évaporation qui est proche de celle ambiante fixée à **35°C**.

La **figure 3.1** montre que le rendement thermique augmente avec la pression de sortie de la pompe. Cette évolution est expliquée par le fait que la puissance fournie par la turbine augmente plus rapidement que celle consommée par la pompe. Par contre pour la **figure 3.2**, le rendement exergetique diminue jusqu'à une pression égale à 25 bars pour ensuite augmenter. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'en se basant sur la formule (2.3) ci-dessous, on peut voir que si W_{net} est faible devant $Q_{payante}$, le rendement exergetique diminue. Ce qui est le cas pour les pressions inférieurs à 25 bars. Mais pour des pressions supérieures à 25bars, W_{net} s'approche de $Q_{payante}$ d'où l'augmentation.

$$\eta_{exergetique} = \frac{T_{\text{évaporation}} \times W_{net}}{(T_{\text{évaporation}} - T_{\text{ambiante}}) \times Q_{payante}} \times 100$$

Ces différents résultats permettent de conclure que la machine peut fonctionner dans les conditions climatiques des deux villages avec comme fluide travail le R245fa ou le R407c, comprimé jusqu'à une pression de 25 bars et chauffé jusqu'à une température de 150°C. Car il

pour les fluides organiques, il n'est pas nécessaire d'aller jusqu'à 350°C. Une température de 150°C suffit largement pour vaporiser les fluides organiques comme le R245fa ou le R407c.

3.2 Les résultats de l'étude financière

Dans cette partie, est traité le cas où le système hybride est composé d'un générateur photovoltaïque et d'un groupe électrogène en appoint (utilisé au maximum deux heures par jour). Dans ce cas, les besoins énergétiques nocturne, diurne et total des deux villages sont donnés en premier dans le **tableau3. 7**. Ensuite après les calculs de la puissance crête du générateur photovoltaïque, du nombre de panneaux, de la capacité de l'installation et du nombre de batteries, on donne le cout d'investissement de la centrale hybride dans le **tableau 3.8**. Après cela, le groupe électrogène est remplacé par une machine thermodynamique (utilisée au minimum huit heures par jour). Dans ce cas également, la puissance crête du générateur photovoltaïque, du nombre de panneaux, de la capacité de l'installation et du nombre de batteries sont calculés pour voir l'impact du remplacement sur ces derniers. Dans le **tableau3.9**, la répartition du besoin énergétique est donnée en fonction des générateurs photovoltaïque et thermodynamique. Dans le **tableau3.10** on donne le cout d'investissement de cette nouvelle centrale avant de terminer avec une comparaison des deux systèmes hybrides.

Premier cas : le système hybride est composé de générateur photovoltaïque et d'un groupe électrogène en appoint

Le tableau ci-dessous donne un résumé des besoins énergétiques des villages de Diongol et de Ngoniam. Les détails de l'estimation des besoins se trouvent en annexe.

Tableau3. 7: Besoins énergétiques des villages de Diongol et de Ngoniam

Type de consommation	Puissance totale appelée (kW)	Energie consommée totale (kWh/j)
SECTEUR DOMESTIQUE		
Ménage à revenu faible	2,400	11,200
Ménage à revenu moyen	8,525	42,900
Ménages à revenu élevé	4,030	25,760
Sous-total secteur domestique	14,955	79,860
SECTEUR COMMUNAUTAIRE		
Case de santé/maternité Diongol	0,240	2,160
Ecole élémentaire de Diongol	0,230	1,140

Eglise	0,105	0,210
Mosquées	0,160	0,320
Foyers des jeunes	0,260	2,780
Eclairage public (15 lampadaires)	0,750	7,125
Sous-total secteur communautaire	1,745	13,735
SECTEUR ECONOMIQUE		
Atelier de couture	0,705	3,495
Boutique	0,010	0,040
Sous-total secteur économique	0,715	3,535
Besoin énergétique total des 02 villages	17,415	97,130
Besoin énergétique nocturne	16,775	76,895
Besoin énergétique diurne	0,64	20,235

En se basant sur ces besoins énergétiques :

☞ La puissance crête totale du générateur photovoltaïque devient :

$$P_c = \frac{E_j \times G_n}{k \times E_i} = \frac{97,130 \times 1000}{0,7 \times 5,08} = 27315 \text{ Wc}$$

AVEC : $k = 0,7$ et $E_i = 5,08 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$

☞ En utilisant un panneau photovoltaïque de 490 Wc dont les caractéristiques se trouvent en annexe, le nombre de panneaux devient :

$$N_p = \frac{P_c}{P_p} = \frac{27315}{490} = 56 \text{ panneaux}$$

☞ La capacité du pack de batterie devient :

$$Q = \frac{N_j \times E_{jN}}{V_{\text{sys}} \times D_p \times R_t \times \eta_{\text{on}} \times \eta_{\text{LAA}}} = \frac{1,2 \times 76895}{48 \times 0,6 \times 1 \times 0,96 \times 0,97} = 3441 \text{ Ah}$$

AVEC : $N_j = 1,2$ jour ; $V_{\text{sys}} = 48\text{V}$; $D_p = 0,7$; $R_t = 1$; $\eta_{\text{on}} = 96\%$; $\eta_{\text{LAA}} = 97\%$

Pour le calcul de la capacité des batteries, on utilise que les besoins énergétiques nocturnes car c'est pendant la nuit que les batteries sont utilisées.

☞ En choisissant des batteries de 1593 Ah et 2V (caractéristiques : voir annexe), le nombre de batteries en parallèles et en séries devient :

$$N_{bs} = \frac{V_{syst}}{V_b} = \frac{48}{2} = 24 \text{ batteries}$$

$$N_{bp} = \frac{C}{C_b} = \frac{3441}{1593} = 2 \text{ batteries}$$

☞ Le nombre total de batterie devient alors :

$$N_b = N_{bp} \times N_{bs} = 2 \times 24 = 48 \text{ batteries}$$

Avec l'utilisation du logiciel Sunny Design nous retrouvons dans les figures 3.13 et 3.14 une partie des résultats ci-dessus et la configuration du système hybride comprenant un groupe électrogène.

Données de configuration photovoltaïques			
Nombre total de panneaux photovoltaïques:	56	Facteur d'util. de l'énergie:	99,7 %
Puissance de crête:	27,44 kWp	Rendement énergétique spécifique*:	1601 kWh/kWp
Nombre d'onduleurs photovoltaïques:	2	Pertes dans les lignes (en % de l'énergie photovoltaïque):	0,19 %
Puissance nominale AC de l'onduleur photovoltaïque:	30,00 kW	Énergie PV utilisée:	18 033,75 kWh
Puissance active AC:	29,40 kW	Part consommée d'énergie photovoltaïque:	41,1 %
Rapport de puissance active:	107,1 %	Part d'énergie photovoltaïque dans l'approvisionnement énergétique (totale):	50,8 %
Énergie photovoltaïque max. disponible*:	43 924 kWh	Part d'énergie photovoltaïque dans l'approvisionnement énergétique (journée):	87,8 %

Figure3. 13 : Données de configuration du système photovoltaïque

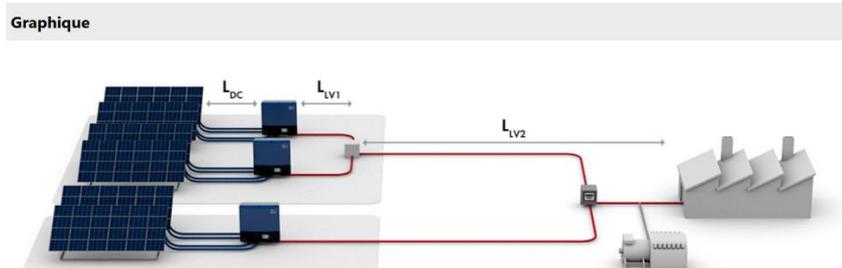


Figure3. 14: Configuration du système hybride composé comprenant un groupe électrogène

En résumé, pour le premier cas, le système hybride est composé de :

- ☞ Cinquante-six (56) modules photovoltaïques monocristallins standard de 490Wc.
- ☞ Quarante-huit (48) accumulateurs étanches VRLA (gel à plaques positives tubulaires) de 2V 1593Ah à C10 ne nécessitant aucun entretien.
- ☞ Deux (2) onduleurs photovoltaïques triphasés de 15340W chacun
- ☞ Six (6) onduleurs-chargeurs de batterie de 4600W montés en deux clusters triphasés de 13,8kW
- ☞ Un groupe électrogène de 15 kVA

Ensuite en se basant sur les couts qui prennent en compte les couts d'investissement initiaux et d'entretien des matériels, fournis par le business plan du projet, on obtient les résultats affichés dans le tableau 3.8. Vous trouverez en annexe des détails sur ces couts.

Tableau3. 8:Cout d'investissement du système hybride comprenant un groupe électrogène

Matériel	Quantité	Prix unitaire (FCFA)	Prix total (FCFA)	Durée de vie (ans)	Taux d'amortissement (%)	Annuité (FCFA/an)
Panneaux photovoltaïques	56	161 082	9 020 592	25	4%	360 824
Batteries sans entretien	48	431 436	20 708 928	10	10%	2 070 893
Onduleur, régulateur hybride	08	2 890 141	23 121 123	15	6,67%	1 541 408
Câblage et support	1	6 596 599	6 596 599	20	5%	329 830
Groupe électrogène	1	7 003 990	7 003 990	30	3,33%	233 466
Clôture et local technique	1	3 778 557	3 778 557	20	5%	188 928
Opération de maintenance	16 072 888 FCFA					
COUT D'INVESTISSEMENT TOTAL			86 302 677 FCFA			

NB : L'opération de maintenance est évaluée sur 10ans avec 1 467 881 FCFA dépensée pour la première année et une augmentation du cout de 2% chaque année.

Second cas : le groupe électrogène est remplacé par une machine thermodynamique qui fonctionne avec de l'énergie solaire

La machine va fournir **50 kWh** par jour et fonctionne que pendant la journée du fait de l'utilisation de l'énergie solaire. Pour pouvoir fournir cette énergie, la machine à cycle ORC peut comme fluide de travail le R245fa, comprimé jusqu'à 25bars et porté à une température de 150°C. Dans ce cas, on aura besoin de :

- ☞ Une puissance de la pompe de : $W_{pompe} = 1,7 \text{ kW}$.
- ☞ Un apport de chaleur de $Q_{payante} = 300 \text{ kW}$.
- ☞ Une turbine qui fournit 50 kWh par jour.

Pour satisfaire ces besoins, la machine à cycle ORC doit être composée de ces éléments suivants dont vous trouverez leurs descriptions en annexe.

- ☞ Une pompe de 2kW capable d'atteindre une pression de 100 bars
- ☞ De vingt (20) capteurs à concentration cylindro parabolique de 15 kW
- ☞ Une turbine de 12,5 kVA ou 10kW qui fonctionne pendant 8 heures.

L'impact sur le système photovoltaïque est que la machine thermodynamique satisfait les besoins énergétiques diurnes c'est-à-dire les **20,253 kWh** et fournit le reste (**29,765 kWh**) pour le chargement des batteries qui satisfont les besoins énergétiques nocturnes c'est-à-dire les **76,895 kWh**. Dans ce cas, les panneaux seront utilisés que pour le chargement des batteries. Ce qui nous donne dans le tableau **3.9**, une répartition des besoins énergétique en fonction des deux générateurs.

Tableau3. 9: Répartition des besoins énergétique en fonction des générateurs

Générateurs	Energie fournie par jour (kWh/j)
Champs photovoltaïque	47,130
Machine thermodynamique	50
TOTAL	97,130

La puissance crête du générateur photovoltaïque devient :

$$P_c = \frac{E_j}{k \times E_i} = \frac{47130}{0,7 \times 5,08} = 13254 \text{ Wc}$$

En utilisant le même type de panneaux qu'au premier cas, le nombre de panneaux devient :

$$N_p = \frac{P_c}{P_p} = \frac{13254}{490} = 28 \text{ panneaux}$$

Concernant le nombre de batteries, c'est le même qu'au cas précédent c'est-à-dire **48 batteries**.

Avec l'utilisation du logiciel Sunny Design nous retrouvons dans les figures 3.15 et 3.16 une partie des résultats ci-dessus et la nouvelle configuration du système hybride où le groupe électrogène est remplacé par une machine thermodynamique. Dans la figure 3.17, nous avons une répartition de l'énergie fournie en fonction du champ photovoltaïque, des batteries et de la machine thermodynamique.

Données de configuration photovoltaïques			
Nombre total de panneaux photovoltaïques:	28	Rendement énergétique spécifique*:	1568 kWh/kWp
Puissance de crête:	13,72 kWp	Pertes dans les lignes (en % de l'énergie photovoltaïque):	0,11 %
Nombre d'onduleurs photovoltaïques:	2	Charge déséquilibrée:	0,00 VA
Puissance nominale AC de l'onduleur photovoltaïque:	16,00 kW	Énergie PV utilisée:	21 512,54 kWh
Puissance active AC:	16,00 kW	Part consommée d'énergie photovoltaïque:	100 %
Rapport de puissance active:	116,6 %	Part d'énergie photovoltaïque dans l'approvisionnement énergétique (journée):	82,6 %
Énergie photovoltaïque max. disponible*:	21 513 kWh	Degré de couverture solaire:	41,9 %
Facteur d'util. de l'énergie:	99,8 %		

Figure3. 15: Données de configuration du nouveau système photovoltaïque

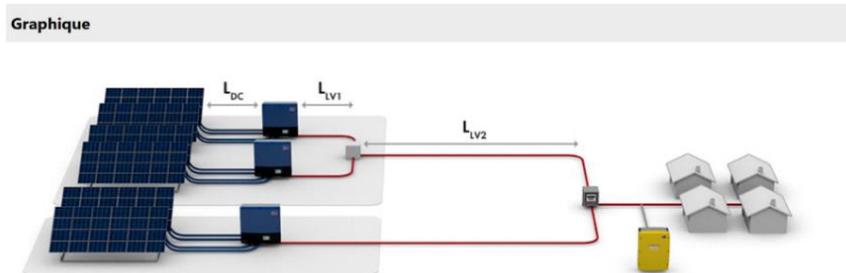
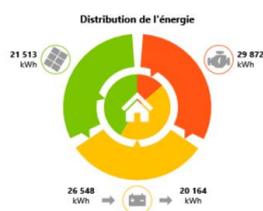


Figure3. 16: Configuration du système hybride composé comprenant une machine thermodynamique

Énergie



Consommation d'énergie annuelle:	45 000 kWh
Énergie photovoltaïque max. disponible:	21 513 kWh
Énergie PV utilisée:	21 513 kWh
Énergie photovoltaïque directement consommée:	18 750 kWh
Énergie photovoltaïque stockée temporairement:	2 763 kWh
Production d'énergie solaire annuelle du groupe électrogène:	29 872 kWh
Nombre de cycles de recharge de la batterie par an:	83
Consommation annuelle de carburant:	181 l

Figure3. 17: Distribution de l'énergie en fonction du champ photovoltaïque, du parc de batteries et de la machine thermodynamique.

Dans ce cas, le nouveau système hybride est composé de :

- ☞ Vingt-huit (28) modules photovoltaïques monocristallins standard de 490Wc.
- ☞ Quarante-huit (48) accumulateurs étanches VRLA (gel à plaques positives tubulaires) de 2V 1593Ah à C10 ne nécessitant aucun entretien.
- ☞ Deux (2) onduleurs photovoltaïques triphasés de 3430W
- ☞ Six (6) onduleurs-chargeurs de batterie de 2300W montés en deux clusters triphasés de 7kW
- ☞ Une pompe de 2kW capable d'atteindre une pression de 100 bars
- ☞ Vingt (20) capteurs à concentration cylindro-parabolique de 15 kW
- ☞ Une turbine de 12,5 kVA ou 10kW qui fonctionne pendant 8 heures.

Le tableau ci-dessous permet d'avoir une appréciation financière du remplacement du groupe électrogène par la machine thermodynamique.

Tableau3. 10 : Cout d'investissement du système hybride composé d'un système hybride et d'une machine thermodynamique

Matériel	Quantité	Prix unitaire (FCFA)	Prix total (FCFA)	Durée de vie (ans)	Taux d'amortissement (%)	Annuité (FCFA/an)
Panneaux photovoltaïques	28	161 082	4 510 296	25	4%	180 412
Batteries sans entretien	48	431 436	20 708 928	10	10%	2 070 893

Onduleur, régulateur hybride	08	2 016 675	16 133 400	15	6,67%	1 076 098
Câblage et support	1	6 596 599	6 596 599	20	5%	329 830
Clôture et local technique	1	3 778 557	3 778 557	30	3,33%	233 466
Compresseur	1	1 701 963	1 701 963	20	5%	85 098
Concentrateurs cylindro parabolique	20	192 225	3 844 500	20	5%	192 225
Turbine	1	11 068 201	11 068 201	25	4%	442 728
Opération de maintenance	16 072 888 FCFA					
COUT D'INVESTISSEMENT TOTAL			84 415 332 FCFA			

En regardant les tableaux **3.8** et **3.10**, on a pu remarquer que le remplacement du groupe électrogène par une machine thermodynamique a permis de diminuer le nombre et le cout des panneaux photovoltaïque utilisés de moitié c'est-à-dire en faisant passer le nombre de 56 à 28 panneaux et leur cout total de **9 020 592 FCFA** à **4 510 296 FCFA**. Le remplacement a permis également de réduire le cout des onduleurs en le faisant passer de **23 121 123 FCFA** à **16 133 400 FCFA**. Toutes ces réductions ont permis de faire une économie de **1 887 345 FCFA** sur le cout d'investissement de la centrale hybride.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans le cadre de notre travail, nous avons été emmenés à étudier la possibilité d'électrifier deux villages sénégalais par une centrale hybride autonome combinant un champ photovoltaïque et une machine thermodynamique à cycle ORC. En effet, dans son projet d'électrifier les villages de Diongol et de Ngoniam, l'association Kassoumaï⁷⁸ avait opté pour une centrale hybride constituée d'un champ photovoltaïque et d'un groupe électrogène. Mais le groupe électrogène utilisant du diesel qui est une source d'énergie fossile son remplacement par une machine thermodynamique a été étudié. Pour se faire, des études techniques et financières sont faites pour voir si la machine thermodynamique fonctionnera dans les conditions climatiques des deux villages. Mais en même temps voir si le remplacement du groupe électrogène par la machine présente un intérêt économique sur le plan de l'investissement.

L'étude technique ou paramétrique a permis de constater que les rendements thermique et exergetique de la machine thermodynamique sont proportionnels à la température de surchauffe et au rendement de la turbine et dans une moindre mesure à la pression de sortie de la pompe. Par contre, ils sont inversement proportionnels à la pression d'entrée de la pompe et sont presque constants en fonction de l'évolution du rendement de la pompe. L'étude paramétrique a montré également que certains fluides ont de meilleurs rendements que d'autres. Cette étude a pu montrer que la machine thermodynamique peut être à cycle ORC avec comme fluide de travail le R245fa avec une faible pression d'entrée de la pompe, une forte pression de sortie, une température de surchauffe élevée et avec des rendements élevés de la pompe et de la turbine.

L'étude financière du remplacement du groupe électrogène par une machine thermodynamique a permis de faire une économie de **1 887 345 FCFA** sur le coût d'investissement de la centrale hybride. Ce qui montre l'intérêt financier du système hybride constitué d'un générateur PV et d'une machine thermodynamique vis-à-vis de celle combinant un générateur PV et d'un groupe électrogène.

Néanmoins, le générateur thermodynamique utilisant l'énergie solaire pour son fonctionnement, est limité par le fait qu'il ne pourrait pas fonctionner en dehors des heures d'ensoleillement. Mais si à la place du solaire thermodynamique, la biomasse est utilisée pour l'alimentation de la chaudière, la machine thermodynamique pourrait être utilisée pendant la nuit. Ce qui permettrait de remplacer les batteries et éventuellement réduirait un peu plus le coût d'investissement.

BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE

- [1] **AGIR. 2018.** Étude du contexte général et de la demande en énergie des villages de Ndiogol et Ngoniam.
- [2] **AG, SMA Solar Technology.** s. d. « Produits et solutions - Vue d'ensemble ». <https://www.sma-france.com/produits/vue-densemble.html>. Consulté le 27 juillet 2022.
- [3] **Akinocho, Gwladys Johnson. s. d.** « Sénégal: le taux d'électrification rural entre 2018 et 2019 ». Agence Ecofin. Consulté le 14 mars 2023.
- [4] **Alibaba.com. s. d.** « Petite Turbine À Vapeur À Condensation, Modèle N0.01-1.7, Petite - Buy Steam Turbine, Condensing Steam Turbine, 10kw Product on Alibaba.com ». <https://french.alibaba.com/p-detail/Small-62240253670.html>. Consulté le 16 mars 2023.
- [5] **Alibaba. 2022a.** « Himin — Miroir Réflecteur Solaire, Miroir Réfléchissant, Pour Les Systèmes De L'énergie Solaire Thermique - ». 2022. <https://french.alibaba.com/p-detail/HIMIN-1600461503592.html?spm=a2700.7724857.0.0.59745d967piL0L>. Consulté le 05 aout 2022.
- [6] **Alibaba. 2022c.** « Tête De Pompe Haute Pression Industrielle, 2.2 Kw, 100 Bars, 2 Pièces - Buy Industrial High Pressure Pump, Industrial High Pressure Pump With Nsk Bearing, Industrial High Pressure Pump For Cleaning Product on Alibaba.com ». 2022. <https://french.alibaba.com/product-detail/industrial-high-pressure-pump-2-2kw-100bar-60418506237.html>. Consulté le 05 aout 2022.
- [7] **Array. 2020.** « Climatisation : les nouveaux fluides HFO nuisent à l'environnement ». Batirama.com. 18 mai 2020. <https://www.batirama.com/article/32061-climatisation-les-nouveaux-fluides-hfo-nuisent-a-l-environnement.html>. Consulté le 16 février 2023.
- [8] « **Atlas solaire mondial** ». s. d. <https://globalsolaratlas.info/download/senegal>. Consulté le 1 août 2022.
- [9] **Ba, Ahmadou Saïd. 2018.** « Accès universel et durable à l'électricité au Sénégal ». Hal-01956217. Working Papers. Working Papers. HAL. <https://ideas.repec.org/p/hal/wpaper/hal-01956217.html>.
- [10] « **Batterie pour Panneau Solaire : Comment Choisir ? Quelle Technologie ?** » s. d. <https://www.batterie-solaire.com/choisir-une-batterie-solaire.htm>. Consulté le 26 juillet 2022.

[11] « **Bienvenue sur le site de S4E2** ». s. d. <https://thopt.s4e2.com/jml/fr/>. Consulté le 31 juillet 2022.

[12] « **Câble pour panneau solaire Solar Câble L=5m/6s qmm MC4-M/F conn. (PV-** ». s. d. Fred Marine (blog). <https://fredmarine.fr/catalogue/cable-pour-panneau-solaire-solarcable-15m-6sqmm-mc4-m-f-conn-pv/>. Consulté le 27 juillet 2022.

[13] **climalife. 2022.** <https://climalife.dehon.fr/r-245fa>. Consulté le 04 aout 2022.

[14] **Enertime. 2014.** « Récupération de chaleur fatale pour la production d'électricité dans l'industrie et applications en Energie Renouvelable », n° 16 (octobre) : 05-09.

[15] « **Entretien des batteries** ». s. d. <https://www.batterie-solaire.com/entretien-batteries>. Consulté le 28 juillet 2022.

[16] « **Fluides frigorigènes** ». 2007. *Energie Plus Le Site* (blog). 25 septembre 2007. <https://energieplus-lesite.be/techniques/climatisation8/composants-installation-frigorifique/fluides-frigorigenes/>. Consulté le 16 février 2023.

[17] **Ibrahim, Hussein, Adrian Ilinca, et Jean Perron. 2008.** « Investigation des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés ». Rapport interne 03. Quebec: Laboratoire de Recherche en Energie Eolienne. <https://constellation.uqac.ca/3238/1/Investigations%20des%20diff%C3%A9rentes%20alternatives%20renouvelables%20et%20hybrides%20pour%20l%27%C3%A9lectrification%20des%20sites%20isol%C3%A9s.pdf>. Consulté le 18 avril 2022.

[18] **Jeune Afrique. 2018.** « Sénégal : le salaire minimum revalorisé pour la première fois depuis 1996 – Jeune Afrique ». JeuneAfrique.com. 3 mai 2018. <https://www.jeuneafrique.com/556925/economie/senegal-le-salaire-minimum-revalorise-pour-la-premiere-fois-depuis-1996/>. Consulté le 31 janvier 2023.

[19] **Karité, Jihane, et Mohamed Cherkaoui. 2019.** « Study of the Different Structures of Hybrid Systems in Renewable Energies: A Review ». *Energy Procedia, Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability (TMREES)*, 157 (janvier): 323-30. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.197>.

[20] « **Le R-245fa est un composé hydrofluorocarbone (HFC)**. <https://climalife.dehon.fr/r-245fa>. Consulté le 30 juillet 2022.

[21] « **Le taux d'électrification rurale en 2023 (ministre Budget)** ».

s. d. <https://aps.sn/detail/1081>. Consulté le 14 mars 2023.

[22] **Mailler, Loic. 2021.** Alimentation électrique autonome d'un site isolé par mini centrale solaire hybride, issue de 2021.

[23] « **Manche balais télescopique** ».

<https://detergentetaccessoire.blogspot.com/2017/01/manche-balais-telescopique.html>.

Consulté le 27 juillet 2022.

[24] **Moine, Gérard. 2016.** L'électrification solaire photovoltaïque. 146 rue de l'Université - 75007 Paris : Observ'ER.

[25] **Moine, Gérard. 2018.** « L'énergie solaire photovoltaïque (PV) : une filière compétitive en site isolé ». Encyclopédie de l'énergie (blog). avril 2018. <https://www.encyclopedie-energie.org/lenergie-solaire-photovoltaique-pv-une-filiere-competitive-en-site-isole/>. Consulté le 16 juillet 2022.

[26] « **Nettoyage et entretien du système photovoltaïque** ». 2022. EdiliziAcrobatica France (blog). 12 février 2022. <https://ediliziacrobatica.fr/nettoyage-et-entretien-du-systeme-photovoltaique/>. Consulté le 28 juillet 2022.

[27] **Nicolas. 2022.** « Entretien des panneaux photovoltaïques : l'essentiel à savoir ». Guide Depanneo (blog). 28 avril 2022. <https://www.depanneo.com/guide/entretien-panneaux-photovoltaïques/>. Consulté le 28 juillet 2022.

[28] « **Pèse acide GEFO CENTRA** ». s. d. <https://www.batterie-solaire.com/pese-acide-gefo-centra-c2x13596662>. Consulté le 28 juillet 2022.

[29] **PVGIS api TMY. 2019.** Diongol PVGIS API TMY.SIT.

[30] **Rachid, Djeflal, Mustapha Samai, Zohir Younsi, Bekkouche Amine, et Noceir Benamrane. 2018.** Analyse économique et environnementale d'un système hybride autonome photovoltaïque/diesel dans la région de ghardaïa (sud de l'Algérie). Constantine-Algérie. https://www.researchgate.net/profile/ZohirYounsi/publication/324562172_analyse_economique_et_environnementale_d'un_systeme_hybride_autonome_photovoltaïquediesel_dans_la_region_de_ghardaia_sud_de_l'algerie/links/5c221395458515a4c7f71fde/analyse-economique-et-environnementale-dun-systeme-hybride-autonome-photovoltaïque-diesel-dans-la-region-de-ghardaia-sud-de-lalgerie.pdf. Consulté le 13 juillet 2022.

[31] « **Roy Énergie-Schema Cellule-V2-scaled-1030x950.jpg (1030x950)** ».

<https://www.gre-enr.fr/wp-content/uploads/2020/05/RoyEnergie-SchemaCellule-V2-scaled-1030x950.jpg>. Consulté le 26 juillet 2022.

[32] **Saheb-Koussa, D., et M. Belhamel. 2007.** « Système hybride (éolien – photovoltaïque – diesel) à fourniture d’énergie électrique totalement autonome », 67-70.

[33] **SIE-Sénégal. 2019.** « Système d’information énergétique (SIE) du Sénégal, rapport 2019 ». Sénégal: Ministère du Pétrole et des Energies.

<https://senpetrogaz.sn/2021/02/05/systeme-dinformation-energetique-du-senegal-rapport-2019/>. Consulté le 09 juillet 2022.

[34] « **SMA SunnyIsland 3324** ». 2022. 2022. <https://www.elysun-store.fr/onduleur-sma-sunnyisland-3324.html>. Consulté le 13 août 2022.

[35] **Smets, Arno, Klaus Jäger, Olindo Isabella, René van Swaij, et Miro Zeman. 2016.**

Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems. PO Box 145 Cambridge CB4 1GQ England: UIT Cambridge Ltd.

<https://fr.fr1lib.org/book/2709703/fd449e?dsourc=recommend>. Consulté le 10 avril 2022.

[36] « **Sunny Design - planning of complete energy systems** ».

<https://www.sma.de/en/products/apps-software/sunny-design.html>. Consulté le 2 août 2022.

[37] « **Thermoptim** ». s. d.

<https://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0405/beiere/1/html/otec/thermo.htm>. Consulté le 31 juillet 2022.

[38] **Thiam, Ababcar. 2022.** « Chapitre 4 : Capteurs solaires à concentration ». Mars 2022.

<http://www.foad.uadb.edu.sn/mod/book/tool/print/index.php?id=2440>.

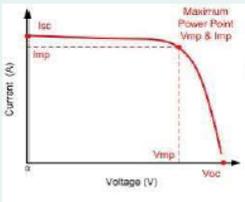
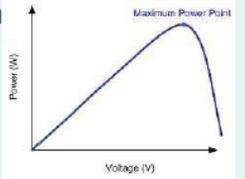
[39] **Todoroff, Ivan. 2018.** « Solaire thermodynamique, une filière industrielle d’avenir ? »

Le blog des idées durables. 11 janvier 2018. <https://www.acteurdurable.org/solaire-thermodynamique/>. Consulté le 09 mai 2022.

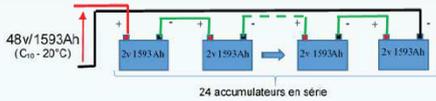
[40] <https://www.agenceecofin.com/electricite/2311-82729-senegal-le-taux-d-electrification-rural-est-passe-de-43-a-54-entre-2018-et-2019>. Consulté le 14 mars 2023 .

[41] **Weick, Clément. 2017.** « Vers un module photovoltaïque à concentration ultra-intégré : développement du concept et des moyens de caractérisations associés ». Phdthesis, Université Grenoble Alpes: Université Grenoble Alpes. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01788752>.

ANNEXE

Composants	Choix
Modules PV Trina Solar Energy TSM- 490DEG18MC.20  	<p><u>Caractéristiques électriques module</u></p> P_c unitaire STC = 490Wc V_{OC} STC module = 51,3V I_{SC} STC module = 12,14A U_{MPP} STC module = 42,4V I_{MPP} STC module = 11,56A Dimensions : 2176x1098x35 m Poids : 26,3 kg
	 
	<p>Le champ solaire de 56 modules est composé de 4 chaînes de 14 modules en série</p> <p><u>Caractéristiques électriques des strings 1 à 4 (14 modules montés en série) :</u></p> P_c String_14 = 6860Wc V_{OC} STC String_14 = 718,2V I_{SC} STC String_14 = 12,14A U_{MPP} STC String_14 = 593,6V I_{MPP} STC String_14 = 11,56A

Source :(Maillier 2021)

Composants	Choix	Justification
Accumulateurs SONNENSCHHEIN A602/1960C SOLAR 	<p><u>Caractéristiques électriques d'un accumulateur</u></p> C_{120} batterie = 1994 Ah (20°C, 1,85Vpc) C_{10} batterie = 1593 Ah (20°C, 1,80Vpc) Tension batterie : 2V Dimensions : $L \times l \times h = 212 \times 277 \times 759$ mm Poids : 106kg <p><u>Caractéristiques électriques des deux parcs d'accumulateurs</u></p> Nb en série = 24 par parc Tension nominale parc : 48V C_{100} parc = 1957 Ah /parc (20°C - 44,4Vpc) C_{10} parc = 1593 Ah /parc (20°C - 43,2Vpc)	<p>L'accumulateur retenu est une batterie étanche VRLA (gel stationnaire à plaques tubulaires) 2V - 1957 Ah à C_{100} (20°C, 1,85Vpc) et 1593 Ah à C_{10} (20°C, 1,80Vpc), ne nécessitant aucun entretien et utilisée pour des applications de cyclage telles que le stockage d'énergie dans les applications solaires ou éoliennes.</p> <p>Pour obtenir la capacité requise, soit 2 batteries de 1593 Ah à C_{10}/48V, on connectera 24 accumulateurs de 2V en série pour chaque parc.</p>  <p>On choisit un cycle de décharge de 60% car avec un profil de charge IU_oU. La durée de vie peut atteindre 2400 cycles.</p> <p>Les batteries sont dans un local technique de 15m² qui est construit dans le site solaire, il disposera d'aération haute ou basse sur tous les côtés.</p> <p>Les batteries se trouvent 3,5m des onduleurs chargeurs.</p>

Source :(Maillier 2021)

Composants	Choix et justification																
<p>Onduleur chargeur SMA Sunny Island 6.0H</p> 	<p>En tant qu'élément clé du SMA Flexible Storage System, le Sunny Island stocke temporairement le courant autoproduit, permettant ainsi une utilisation de l'électricité solaire 24h/24. La classe de protection élevée, la grande plage de température et la capacité de surcharge très élevée assurent en continu la sécurité nécessaire aux installations en site isolé. La gestion intelligente de la charge et de l'énergie garantit le fonctionnement même dans des situations critiques.</p> <p>Sortie AC batterie</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Caractéristiques techniques (Mode de fonctionnement en site isolé)</th> <th>Sunny Island 6.0H</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tension de réseau assignée / Plage de tension AC</td> <td>230 V / 202 V à 253V</td> </tr> <tr> <td>Fréquence assignée / Plage de fréquence (réglable)</td> <td>50 Hz/45 Hz à 65 Hz</td> </tr> <tr> <td>Puissance assignée (pour U_{nom}, f_{nom} / 25 °C / $\cos \varphi = 1$)</td> <td>4600W</td> </tr> <tr> <td>Puissance AC à 25 °C pendant 30 min / 5 min / 3 s</td> <td>6000W / 6800W / 11000W</td> </tr> <tr> <td>Puissance AC à 45 °C</td> <td>3700 W</td> </tr> <tr> <td>Courant assigné / Courant de sortie maximal (crête)</td> <td>20 A / 120 A</td> </tr> <tr> <td>Taux de distorsion harmonique tension de sortie / Facteur de puissance à la puissance assignée</td> <td>< 1,5 % / -1 à +1</td> </tr> </tbody> </table> <p>La centrale doit alimenter les villages en triphasé. Dans ce cas, les onduleurs sont câblés par trois et forment ainsi des clusters et coté AC, les onduleurs de chaque cluster doivent être raccordés à trois phases différentes.</p> <p>Pour déterminer le nombre d'onduleurs nécessaires, le constructeur préconise d'utiliser la formule suivante : Nombre d'onduleurs = P_{max} / P_{30min}</p> <p>P_{max} : Puissance maximale sollicitée par les charges par jour. Ici $P_{max} = 167755W$ (voir page 18) P_{30min} : Puissance de l'onduleur pendant 30 min à 25 °C</p> <p>☞ En triphasé le résultat doit être arrondi vers le haut au prochain chiffre divisible par trois. Les onduleurs peuvent ainsi se répartir symétriquement sur les phases.</p>	Caractéristiques techniques (Mode de fonctionnement en site isolé)	Sunny Island 6.0H	Tension de réseau assignée / Plage de tension AC	230 V / 202 V à 253V	Fréquence assignée / Plage de fréquence (réglable)	50 Hz/45 Hz à 65 Hz	Puissance assignée (pour U_{nom} , f_{nom} / 25 °C / $\cos \varphi = 1$)	4600W	Puissance AC à 25 °C pendant 30 min / 5 min / 3 s	6000W / 6800W / 11000W	Puissance AC à 45 °C	3700 W	Courant assigné / Courant de sortie maximal (crête)	20 A / 120 A	Taux de distorsion harmonique tension de sortie / Facteur de puissance à la puissance assignée	< 1,5 % / -1 à +1
Caractéristiques techniques (Mode de fonctionnement en site isolé)	Sunny Island 6.0H																
Tension de réseau assignée / Plage de tension AC	230 V / 202 V à 253V																
Fréquence assignée / Plage de fréquence (réglable)	50 Hz/45 Hz à 65 Hz																
Puissance assignée (pour U_{nom} , f_{nom} / 25 °C / $\cos \varphi = 1$)	4600W																
Puissance AC à 25 °C pendant 30 min / 5 min / 3 s	6000W / 6800W / 11000W																
Puissance AC à 45 °C	3700 W																
Courant assigné / Courant de sortie maximal (crête)	20 A / 120 A																
Taux de distorsion harmonique tension de sortie / Facteur de puissance à la puissance assignée	< 1,5 % / -1 à +1																

Source :(Maillier 2021)

Composants	Choix	Justification
Câble de chaîne	<p>Câble unipolaire de type PR double isolation</p>  <p>($2 \times 1 \times 4 \text{mm}^2$)</p>	<p>Le champ solaire de 84 modules est composé de 4 chaînes de 16 modules en série et d'une chaîne de 20 modules en série. Chaque chaîne est câblée à un onduleur photovoltaïque via un coffret DC, les deux se trouvant dans le local. La longueur moyenne des câbles est :</p> <ul style="list-style-type: none"> Câble String 1 → Tracker A onduleur PV1 : 2x30m Câble String 2 → Tracker A onduleur PV2 : 2x30m Câble String 3 → Tracker B onduleur PV1 : 2x30m Câble String 4 → Tracker A onduleur PV2 : 2x30m <p>Dans le boîtier DC (CDC sur le schéma), chaque chaîne sera protégée par des fusibles 10A sur chaque polarité.</p> <p>On détermine la section en fonction de la chute de tension. On limite la chute de tension entre chaque chaîne et chaque entrée à 1% : $\Delta U \leq 2 R_L L I$</p> <p>D'où la résistance linéique la plus petite pour la chaîne 1 : $R_L \leq (0,01 \times 593,6) / (2 \times 30 \text{m} \times 11,56 \text{A}) = 0,00855 \Omega/\text{m}$</p> <p>Donc d'après le tableau page précédente une section $\geq 4 \text{mm}^2$ convient.</p>
<p>Liaisons entre modules</p> <p>Dispositif de protection des chaînes PV</p>	<p>Connecteurs MC4</p>  <p>Boîtier de jonction chaînes PV CDC + Interrupteur/sectionneur bipolaire</p>	<p>Le courant assigné I_n du dispositif de protection est $I_n = I_{SC \text{ max}} = 9,05 \text{ A}$</p> <p>Donc l'interrupteur sectionneur devra être calibré à un courant admissible $I_z > 1,3 \cdot I_n = 11,76 \text{ A}$</p> <p>Un interrupteur sectionneur bipolaire $\geq 20 \text{ A}$ permettra donc de couper le courant en provenance des chaînes PV pour le contrôle et la maintenance.</p>

Source :(Maillier 2021)

Saifs SPA-70 700 Bar Air pompe hydraulique pneumatique pompe à clé dynamométrique hydraulique

1 - 4 Jeu **2 500,00 \$US** >= 5 Jeu **2 000,00 \$US**

Avantages: Remboursements rapides pour les commandes inférieures à 1 000 USD

[Réclamez maintenant >](#)

Type **Hydraulic Piston Pump**

Débit maximal **0.85 L/min**

Échantillons:

Commande min. : 1 Jeu **2 000,00 \$US/Jeu**

[Acheter des échantillons](#)

Délai ⓘ

Quantity(Jeu)	1 - 10	> 10
Durée estimée (jours)	15	À négocier

Personnalisation Logo personnalisé (Commande min. 1 Jeu)
Emballage personnalisé (Commande min. 1 Jeu)
Plus ▾

Expédition : **Express** • Fret maritime • Fret terrestre • Fret aérien

Vue d'ensemble

Description rapide

Garantie:	3 ans	Support personnalisé:	OEM, ODM, OBM
Marque nom:	SAIVS	Numéro de Type:	SPA-70
Point d'origine:	Zhejiang, China	Application:	L'industrie automobile, Industriel Utilitaires, Usinage, ...
Source d'énergie:	Electrique	Pression:	Pression Ultra Haute, 70-700bar
Structure:	Pompe à piston	motor:	3KW
Débit d'huile:	0.85-8L/min	Puissance:	3kw
Utilisable Huile:	5L	Air Pression:	4-8bar
Capacité:		Gamme:	
Poids:	22kg	Dimension:	490x229x500
Certificat:	CE, ISO9001:2008		

Capacité d'approvisionnement

Capacité d'approvisionnement... 500 Ensemble/Ensembles per Month

Source :(Alibaba 2022c)



Petite turbine à vapeur à condensation, modèle N0.01-1.7, petite

FOB Référence Prix: [Obtenir le Dernier Prix](#)

18 000,00 \$US - 22 000,00 \$US / Jeu | 1 Jeu/Jeu (Commande min.)

MARCH EXPO Économisez jusqu'à US \$30 avec PayPal >

Avantages: Remboursements rapides pour les commandes inférieures à 1 000 USD [Réclamez maintenant >](#)

Qualité: Jeu

Délai ⓘ

Quantity (Jeu)	1 - 1	> 1
----------------	-------	-----



Vue d'ensemble

Description rapide

Condition:	Nouveau	Garantie:	1 AN
Industries applicables:	L'énergie et L'exploitation Minière, Aliments et Boisso...	Showroom	Aucun
Vidéo sortant d'inspection:	Fourni	Emplacement:	
Marketing Type:	Produit ordinaire	Machines Rapport D'essai:	Fourni
Composants de base:	Moteur	Garantie des éléments de base:	1 AN
Numéro de Type:	N0.01-1.7	Point d'origine:	Sichuan, China
Type de générateur de l'électricité:	Thermique Puissance	Marque nom:	DTEC
Clé Vente Points:	Durable	Type:	Plante
Nom:	Petite Turbine À Vapeur 10KW	Tension de Sortie (V):	220
Puissance nominale:	10KW	Application:	Centrale
Vitesse de rotation:	3000/3600	Certificat:	Iso9001
Générateur:	Trois Phase	Tension nominale:	220/380/400/440
		Utilisation:	Thermique
		Structure:	Unique couche
		Fournir Portée:	Solution complète

(Alibaba.com s. d.)



[View larger image](#)

Prêt à être expédié [En stock](#) [Expédition rapide](#)

HIMIN — miroir réflecteur solaire, miroir réfléchissant, pour les systèmes de l'énergie solaire thermique

300,00 \$US / Pièce 10 Pièce(min. Order)

Avantages: Remboursements rapides pour les commandes inférieures à 1 000 USD [Réclamez maintenant >](#)

Type : Sac à dos 300,00 \$US

Quantité(Pièce)	1 - 10	11 - 100	>100
Durée estimée (jours)	10	15	À négocier

Source :(Alibaba 2022a)

Point	Valeur
Garantie	3months-1year
Lieu D'origine	Chine
Marque Nom	HIMIN
Numéro de modèle	1.1mm
Nom du produit	Miroir de collecteur solaire de haut niveau pour concentrer les systèmes d'énergie solaire
Matériel & Matériel Standard	Verre flottant Ultra clair, standard SMFG2004-03, verre de qualité miroir de qualité supérieure
Épaisseur	1.1mm
Puissance de charge (W)	5000w 10kw 15KW
Tension de sortie (V)	110/120/220/230V
Peinture	Pur Blanc, Beise
Certificat	CE, ISO9001 :2008,SGS etc
Garantie	20 ans
Application	Solaire Thermique
Inspection standard	Surface sans rayures, sans empreinte de main, sans marque d'épuisement, Pas de tache, pas de moisissure, bord d'avalanche, manque d'angle, etc. Miroir en verre, miroir propre, et il n'y a pas de tache, besmirch.

Source :(Alibaba 2022a)



SMA SunnyIsland 3324

[Envoyer à un ami](#)

Livraison : 24/48h

Disponibilité : En stock

3 077,60 €

2564,67 € HT

Quantité :

 AJOUTER AU PANIER

 Acheter avec PayPal

(« SMA SunnyIsland 3324 » 2022)

Caractéristiques techniques

Sortie AC (consommateur)

Tension nominale AC (réglable)	230 V (202 V – 253 V)
Fréquence nominale AC (réglable)	50 Hz (45 Hz – 55 Hz)
Puissance continue AC à 25 °C / 45 °C	3300 W / 2300 W
Puissance AC à 25 °C pendant 30 min / 1 min / 3 s	4200 W / 5000 W / 7300 W
Courant nominal AC / Courant AC max.	14,5 A / 70 A pendant 100 ms
Coefficient de distorsion harmonique tension de sortie / Facteur de puissance (cos φ)	< 3 % / –1 à +1

Entrée AC (générateur ou réseau)

Tension d'entrée (plage)	230 V (172,5 V – 264,5 V)
Fréquence d'entrée AC (plage)	50 Hz (40 Hz – 60 Hz)
Courant d'entrée max. (réglable) / Puissance d'entrée max.	56 A (2 A – 56 A) / 12,8 kW

Entrée DC batterie

Tension de la batterie (plage)	24 V (21 V – 32 V)
Courant de charge de la batterie max. / Courant de charge continu à 25 °C	140 A / 104 A
Type de batterie / Capacité de la batterie (plage)	Plomb / 100 – 6000 Ah
Régulation de charge	Processus IUoU

Rendement / Autoconsommation

Rendement max.	94,5 %
Autoconsommation sans charge / veille	22 W / 4 W

Dispositifs de protection

Protection inversion de polarité DC / Fusible DC	Oui / Oui
Court-circuit AC / Surcharge AC	Oui / Oui
Surchauffe / Décharge excessive de la batterie	Oui / Oui

Caractéristiques générales

Dimensions (L / H / P) en mm	390 / 590 / 245
Poids	39 kg
Plage de températures de fonctionnement	–25 °C ... +50 °C
Indice de protection (selon CEI 60529)	Montage intérieur (IP30)

(« SMA Sunny Island 3324 » s. d.)



Type de consommation	Matériels	Nombre	Puissance Unitaire (W)	Puissance Totale (W)	Temps d'Utilisation	Durée d'Utilisation (Heures)	Utilisation diurne	Utilisation nocturne	Besoin énergétique diurne (Wh)	Besoins énergétique nocturne (Wh)	Energie (Wh)
Ménages à revenu faible (16)	Eclairage	80	5	400	19h-07h	8	0	8	0	3200	3200
	Radio Simple/ K7	16	75	1200	13h-14h et 19h-22h	4	1	3	1200	3600	4800
	Téléviseur N&B	16	50	800	19h-23h	4	0	4	0	3200	3200
Ménages à revenu moyen (44)	Eclairage	440	5	2200	19h-07h	8	0	8	0	17600	17600
	Radio Simple/ K7	44	75	3300	13h-14h et 19h-22h	4	1	3	3300	9900	13200
	Téléviseur couleur	44	65	2860	19h-23h	4	0	4	0	11440	11440
	Ordinateurs PC	3	55	165	11h-13h et 21h-23h	4	2	2	330	330	660
Ménages à revenu élevé (13)	Eclairage	182	5	910	19h-07h	8	0	8	0	7280	7280
	Frigidaire	6	125	750	12h-16h et 19h-07h	12	4	8	3000	6000	9000
	Radio Simple/ K7	13	75	975	13h-14h et 19h-22h	4	1	3	975	2925	3900
	Téléviseur couleur	13	65	845	19h-23h	4	4	0	3380	0	3380
	Ordinateurs PC	5	55	275	11h-13h et 21h-23h	4	2	2	550	550	1100
	Ventilo	5	55	275	23h-03h	4	0	4	0	1100	1100
Sous total				14955					12735	67125	79860

BESOIN EN ENERGIE DU SECTEUR COMMUNAUTAIRE

Type de consommation	Matériels	Nombre	Puissance Unitaire (W)	Puissance Totale (W)	Temps d'Utilisation	Durée d'Utilisation (Heures)	Utilisation diurne	Utilisation nocturne	Besoin énergétique diurne (Wh)	Besoins énergétique nocturne (Wh)	Energie (Wh)
Case de santé/maternité (Diongol)	Eclairage	10	5	50	19h-07h	8	0	8	0	400	400
	Frigo-bar	1	125	125	12h-16h et 19h-07h	12	4	8	500	1000	1500
	Téléviseur N&B	1	65	65	19h-23h	4	0	4	0	260	260
Ecole de Diongol	Eclairage	11	5	55	8h-12h et 15h-19h	8	4	4	220	220	440
	Ordinateurs PC	2	55	110	19h-23h	4	0	4	0	440	440
	TV vidéo	1	65	65	19h-23h	4	0	4	0	260	260
Eglise de Diongol	Eclairage	8	5	40	9h-11h	2	2	0	80	0	80
	Matériel audio	1	65	65	9h-11h	2	2	0	130	0	130
Mosquées (2 petites)	Eclairage	6	5	30	19h30-20h30 et 5h-6h	2	0	2	0	60	60
	Matériel audio	2	65	130	5h-20h30	2	1	1	130	130	260
Foyers des jeunes (02)	Eclairage	30	5	150	22h-5h	7	0	7	0	1050	1050
	Chaîne à Musique	2	55	110	18h-5h	11	1	10	110	1100	1210
	TV vidéo	2	65	130	18h-21h	4	1	3	130	390	520
Sous total				1125					1300	5310	6610

BESOINS EN ENERGIE POUR L'ECLAIRAGE PUBLIC

Type de consommation	Matériels	Nombre	Puissance Unitaire (W)	Puissance Totale (W)	Temps d'Utilisation	Durée d'Utilisation (Heures)	Utilisation diurne	Utilisation nocturne	Besoin énergétique diurne (Wh)	Besoins énergétique nocturne (Wh)	Energie (Wh)
Lampadaires (15)	Eclairage public	5	50	250	20h-5h30	9,5	0	9,5	0	2375	2375
		10	50	500	20h-5h30	9,5	0	9,5	0	4750	4750
Sous total				750							7125
BESOINS EN ENERGIE DU SECTEUR ECONOMIQUE											
Type de consommation	Matériels	Nombre	Puissance Unitaire (W)	Puissance Totale (W)	Temps d'Utilisation	Durée d'Utilisation (Heures)	Utilisation diurne	Utilisation nocturne	Besoin énergétique diurne (Wh)	Besoins énergétique nocturne (Wh)	Energie (Wh)
Ateliers de couture (03)	Eclairage	6	5	30	19h-23h	4	0	4	0	120	120
		9	75	675	10h-13h et 19h-21h	5	3	2	2025	1350	3375
Boutique (01)	Eclairage	2	5	10	19h-23h	4	0	4	0	40	40
Sous total				715							3535