AUTONOMISATION ENERGETIQUE D'UNE FERME AGRICOLE INTEGREE A DJIDJA, BENIN

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU

MASTER GESTION DES INFRASTRUTURES & SERVICES

OPTION **:** ENERGIES RENOUVELABLES

Présenté et soutenu publiquement le 10 Décembre 2025 par

Kevin Paterne BAKPE

Travaux dirigés par : Béranger TCHIBOZO

Ingénieur en GÉNIE ENERGÉTIQUE

Directeur Technique MRI

Jury d'évaluation du stage :

Président : Gomna ABOUBAKAR

Membres et correcteurs : Brice HAPPI

Singho BOLY

Mai, 2025

CITATIONS

« Passer aux énergies renouvelables est un impératif pour protéger notre planète. » -Scientifiques du GIEC

« Les énergies renouvelables sont la voie de l'avenir. Elles sont propres, elles sont infinies, et elles créent des emplois. » - Ban Ki-moon, ancien Secrétaire général de l'ONU (2007-2016)

DEDICACES

A ma grand-mère, improbable analphabète qui m'inculqua la passion des sciences,

A ma mère, pilier de notre grande famille, à qui je dois bien plus que ces quelques pages et dont la force m'inspire chaque jour,

A mes enfants, pour leur sourire dans nos tempêtes.

.

REMERCIEMENTS

Ce travail est la consécration d'efforts en vue d'obtenir le diplôme de MASTER en Gestion des Infrastructures et Services, option ÉNERGIES RENOUVELABLES.

Mes gratitudes :
A la Direction de 2IE,
A l'ensemble du personnel de 2IE,
A la Direction de la Ferme Intégrée SADONOU,
A tout le personnel technique et ouvrier de la Ferme Intégrée SADONOU,
A mon épouse pour son coaching,
A mon frère Oscar, fidèle compagnon,
A mon ami-frère Victor AMADJI pour son accompagnement depuis deux décennies,
A feu OHOSSA François, motivateur sans pareil.

RÉSUMÉ

Le secteur agricole au Bénin est confronté à des défis majeurs liés au changement climatique et au déficit énergétique entravant la productivité et la modernisation des fermes. La dépendance aux énergies fossiles, coûteuses et polluantes, ainsi que l'absence de raccordement aux réseaux électriques motivent la recherche de solutions durables. Ce mémoire explore l'autonomisation énergétique d'une ferme agricole à Djidja, Ferme Intégrée Sadonou (FIS), en combinant agriculture, élevage et transformation afin d'optimiser ses performances grâce aux énergies renouvelables tout en améliorant sa rentabilité et sa résilience climatique.

L'étude suit une approche pluridisciplinaire, incluant un diagnostic énergétique des besoins (irrigation, éclairage, machines), une évaluation des ressources locales (ensoleillement, vent, biomasse), une modélisation technico-économique de système hybride et une analyse des impacts socio-économiques et environnementaux.

Les résultats montrent que la ferme FIS de Djidja bénéficie d'un bon potentiel énergétique : ensoleillement de 5,2 kWh/m²/j, vitesse moyenne de vent de 3-4 m/s, et ressources abondantes en biomasse. Le mix énergétique envisagé combine des panneaux solaires (24,2 kWc), une éolienne (20 kW), un bio digesteur (32 m³) et une batterie de 72 kWh, permettant de couvrir quasiment 100 % des besoins énergétiques, en dehors de la force motrice des tracteurs, pour un coût de 0,078 USD/kWh, bien inférieur aux sources conventionnelles.

Les impacts sont multiples : une réduction de plus de 90 % des dépenses énergétiques, des revenus additionnels par la vente d'électricité et de biofertilisants, une économie de 250 tonnes de CO_2 par an et une amélioration des conditions de travail. Le projet démontre la faisabilité de l'autonomisation énergétique grâce aux énergies renouvelables dans les zones rurales béninoises. Il constitue un modèle reproductible en Afrique, à condition de bénéficier d'un accompagnement politique et d'une adaptation aux réalités locales.

Mots Clés :

1 - Autonomie énergétique
2 – Énergies renouvelables
3 – Ferme intégrée
4 - Biogaz
5 – Résilience climatique

ABSTRACT

The agricultural sector in Benin faces major challenges related to climate change and energy deficits, which hinder farm productivity and modernization. Dependence on expensive and polluting fossil fuels, as well as the lack of connection to electricity grids, are driving the search for sustainable solutions. This thesis explores the energy autonomy of an integrated agricultural farm in Djidja, combining crop cultivation, livestock farming, and processing, in order to optimize its performance through renewable energy, thus improving its profitability and climate resilience.

The study follows a multidisciplinary approach, including an energy assessment of needs (irrigation, lighting, machinery), an assessment of local resources (sunlight, wind, biomass), a techno-economic modeling of a hybrid system, and an analysis of socio-economic and environmental impacts.

The results show that the FIS Djidja farm benefits from good energy potential: sunshine of 5.2 kWh/m²/day, wind speeds of 3-4 m/s, and abundant biomass resources. The proposed energy mix combines solar panels (24,2 kWp), a wind turbine (20 kW), a bio digester (32 m³), and a 72-kWh battery, making it possible to cover almost 100% of energy needs beyond tractor power at a cost of USD 0.078/kWh, lower than conventional sources.

The impacts are multiple: a reduction of more than 90% in energy costs, additional income from the sale of electricity and biofertilizers, savings of 250 tons of CO_2 per year, and improved working conditions. The project demonstrates the feasibility of energy self-sufficiency through renewable energy in rural Benin. It constitutes a model that can be reproduced in Africa, provided it benefits from political support and adaptation to local realities.

Key words:

1 - Energy Self-Sufficiency
2 - Renewable Energy
3 – Integrated farming
4 - Biogas
5 – Climate resilience

LISTE DES ABRÉVIATIONS

GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur le Climat
INStaD	Institut National des Statistiques et de l'Analyse Démographique
ATDA	Agence Territoriale de Développement Agricole
LCOE	Levelized Cost of Energy, en français, coût actualisé de l'énergie
IRENA	International Renewable Energy Agency
EnR	Énergies Renouvelables
AC	Alternatif Current, Courant alternatif
DC	Direct Current, Courant Continu
DoD	Depth of Discharge, profondeur de décharge
SOC	State of charge, État ou niveau de charge d'une batterie
BMS	Battery Management System, Système de Gestion de la batterie
MPPT	Maximum Power Point Tracking
Ku	Facteur d'utilisation
Ks	Facteur de Simultanéité
HEPP	Heure Équivalente Pleine Puissance
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
SBPE	Société Béninoise de Production d'Énergie
SBEE	Société Béninoise d'Énergie Électrique
CAPEX	Capital Expenditure, Dépenses d'Investissement
OPEX	Operational Expenditure, Dépenses d'exploitation
DCRI	Délai de Récupération du Capital Investi
ROI	Return on Investisment
VAN	Valeur Actuelle Nette
TRI	Taux de Rentabilité Interne
VS	Fraction organique biodégradable des intrants (fumier, déchets agricoles, etc.) qui peut être convertie en biogaz par les bactéries anaérobies.
MS	Matières Sèches, masse après évaporation d'eau ; VS = MS – Cendres

SOMMAIRE

I. CADRE THÉORIQUE ET CONCEPTUEL DE L'AUTONOMISATION ÉNERGÉTIQUE ET DE L'AGRICULTURE INTÉGRÉE 6

A. Théorie et Concept de l'autonomisation ÉnergÉtique 6

1. Définition de l'autonomisation ÉNERGÉTIQUE 6
2. Objectifs et avantages de l'autonomisation énergétique 6
3. Technologies d'autonomisation énergétique en milieu rural 7

B. Concept de ferme agricole intégrée 8

1. Définition 8
2. Fonctionnement d'une ferme agricole intégrée 9
3. Objectifs et impacts de la ferme FIS 13

C. Interdépendance entre énergie et agriculture intégrée 13

1. Les besoins énergétiques d'une ferme intégrée 13
2. L'énergie comme levier de durabilité de l'activité agricole 13

D. Approches théoriques mobilisées 14

1. Approche systémique 14
2. Théorie de la résilience 14

E. Objectifs du travail et Hypothèses de recherche 14

1. Objectifs du travail 14
2. Hypothèses de recherche 15

F. Techniques et outils de collecte de données 15

G. Intérêts de l'étude 16

II. DIAGNOSTIC ENERGETIQUE DE LA FERME 17

A. HYPOTHESES DE BASE 17

B. IDENTIFICATION DES BESOINS ENERGETIQUES 19

1. Calcul des consommations énergétiques par unité 19
2. Adéquation entre activités agricoles et sources d'énergie 20

C. LCOE DES ENR EXPLOITABLES SUR LE SITE 24

1. LCOE DES BIOENERGIES 25

D. Sources d'énergie à exploiter 26
1. Forces et faiblesses des sources d'énergie exploitable 26
2. Synergie solaire-éolien à Djidja 28

E. Analyse des forces et faiblesses du projet 29
1. Analyse SWOT 29
2. Analyse PESTEL 32

III. PROPOSITION D'UN SYSTEME D'AUTONOMISATION ENERGETIQUE (Dimensionnement, faisabilité et Maintenance) 34

A. Dimensionnement et Choix des Composantes 34
1. Dimensionnement et choix du système solaire photovoltaïque 34
2. Dimensionnement et choix du système thermique 38
3. Dimensionnement et choix des cuiseurs solaires 44
4. Dimensionnement et choix des éoliennes 45
5. Dimensionnement du système de méthanisation 50
6. Composition du mix énergétique de la ferme 53

B. Faisabilité technique et schémas 55
1. Faisabilité technique du projet 55
2. Schémas et plans de réalisation 57

C. Contenus de Maintenance 59

IV. ETUDE DES COÛTS ECONOMIQUES 61

A. investissement dans le solaire photovoltaïque 61
1. Composantes 61
2. Devis d'implantation du système solaire photovoltaïque 62
3. Étude de rentabilité de la phase photovoltaïque 62

B. investissement dans l'éolien 67
1. Composantes 67
2. Devis d'implantation du système éolien 67
3. Étude de rentabilité de la phase éolienne 68

C. Investissement dans la méthanisation 71
1. Hypothèses de travail 71
2. Étude de rentabilité du système de méthanisation 71

D. Investissement dans le solaire thermique 73
1. Données de base 73
2. Tableaux des amortissements 74
3. Calcul des ratios de rentabilité 74

4. Synthèse de l'étude économique de l'autonomisation énergétique de la ferme 75

E. Optimisation, Risques et Atténuation. 77

1. Optimisation 77
2. Risques 77
3. Atténuation des risques 77

V. DISCUSSIONS ET ANALYSES 79

A. Appréciation générale du mix énergétique proposé 79

B. Analyse critique du système photovoltaïque et éolien 80

1. Dimensionnement et couverture des besoins électriques 80
2. Capacité de stockage et autonomie 80
3. Apports et limites des dispositifs solaires thermiques 80
4. Impacts de la méthanisation et de la substitution du gaz 81
5. Réduction des usages de bois et impacts environnementaux 82
6. Place de l'écotourisme dans la résilience économique 82
7. Analyse des coûts de production et des ratios de rentabilité 83

VI. Analyse des impacts, limites et perspectives du modèle proposé. 87

A. Les impacts de l'autonomisation énergétique de la ferme 87

1. Impacts économiques 87
2. Impacts socio-culturels 87
3. Impacts environnementaux 88

B. Limites et axes d'amélioration du modèle 89

1. Limites du modèle proposé 89
2. Perspectives globales 89

C. Bilan carbone du projet 89

1. Émissions générées de carbone 89
2. Émissions évitées de carbone 91
3. Bilan net des émissions CO_2 94

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Bilan des consommations journalières d'énergie 19
Tableau 2 : Tableau de correspondance entre activités agricoles et sources d'énergie 20
Tableau 3: Tendance Coût total installé, facteur de charge et LCOE par technologie 24
Tableau 4:Sources d'énergies à exploiter 26
Tableau 5 : Analyse SWOT du projet 30
Tableau 6 : Analyse PESTEL du projet 32
Tableau 7 : Type de séchage suivant spéculation 38
Tableau 8 : Proportion d'eau à extraire pour le séchage des produits agricoles 39
Tableau 9 : Masse d'eau globale à faire évaporer 40
Tableau 10 : Composants du séchoir solaire 42
Tableau 11 : Plan de maintenance des systèmes de la ferme FIS 59
Tableau 12 : Devis d'implantation du système solaire photovoltaïque 62
Tableau 13: Tableau des investissements dans le solaire 64
Tableau 14: Synthèse des résultats de l'analyse financière du projet solaire 66
Tableau 15 : Devis d'implantation de système éolien 67
Tableau 16 : Tableau des amortissements de l'investissement éolien 69
Tableau 17 : Synthèse des résultats de l'analyse financière du projet éolien 70
Tableau 18 : Tableau des amortissements de la phase méthanisation 72
Tableau 19 : Tableaux des amortissements du solaire thermique 74
Tableau 20: Synthèse des indicateurs de rentabilité 75
Tableau 21: Comparaison des LCOE 83
Tableau 22 : Comparaison des ratios de rentabilité financière solaire et éolien 84
Tableau 23 : Comparaison des principaux risques 85
Tableau 24 : Tableau synthétique des émissions générées 90
Tableau 25 : Tableau des émissions CO2 évitées 93

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Cadastre du domaine de la ferme FIS 9
Figure 2 : Distribution spatiale de la ferme. Source : Direction de FIS 11
Figure 3 : Organigramme de la ferme FIS de Djidja Source : Direction de FIS 12
Figure 5 : Architecture du réseau PV + Éolien 50
Figure 6 : Schéma intégrant panneaux PV, éolienne, bio digesteur et systèmes thermiques 58

LISTE DES GRAPHIQUES

Graphique 1 : Heures moyennes mensuelles ensoleillées 17
Graphique 2: Température Moyenne mensuelle 17
Graphique 3 : Vitesse du vent 17
Graphique 4: Rayonnement solaire moyen mensuel incident 17
Graphique 5: Débit moyen annuel du fleuve Couffo 25
Graphique 6 : Courbe de puissance de l'éolienne 20 kW 48
Graphique 7 : Courbe de puissance de l'éolienne 25 kW 49

INTRODUCTION

Contexte général

Le secteur agricole fait face à de multiples défis, notamment le changement climatique et la hausse des coûts énergétiques. En réponse, des modèles agricoles plus durables comme l'agroforesterie et l'agriculture de conservation se développent. Au Bénin, où l'agriculture représente 27 % du PIB et emploie plus de 70 % de la population active selon l'annuaire statistique 2024 de l'INStaD, le modèle dominant reste extensif et dépendant de la pluviométrie, ce qui limite sa productivité et sa rentabilité. Dans ce contexte, la ferme agricole intégrée émerge comme une alternative prometteuse, elle combine diverses activités agricoles (élevages, cultures, transformations, pisciculture) de manière synergique, en optimisant l'usage des ressources locales et en réduisant les pertes. L'enjeu central pour ces fermes est l'accès à une énergie fiable et abordable alors que dans les zones rurales comme Djidja, l'accès à l'électricité reste en général limité ; dans le village Sawlakpa où se situe la ferme, elle est inexistante. L'autonomisation énergétique, fondée sur l'utilisation de sources d'énergies renouvelables locales, constitue dès lors une solution durable. Elle permet non seulement d'améliorer la productivité et de réduire les coûts, mais aussi de renforcer la résilience des exploitations agricoles face aux aléas climatiques et économiques. Ce modèle soutient ainsi une transition vers une agriculture plus durable et une économie rurale plus robuste.

Justification du choix du sujet

Ce mémoire découle d'une ambition de combiner orientation professionnelle et passion agricole. Il s'appuie sur les politiques béninoises promouvant les énergies renouvelables décentralisées face aux difficultés énergétiques persistantes dans les communes rurales comme Djidja. La mise en place d'un système d'autonomisation énergétique pour une ferme intégrée apparaît comme une solution concrète. Ce travail s'inscrit dans une démarche de développement rural durable et de transition agro écologique, tout en visant à enrichir la documentation scientifique et proposer un modèle adaptable et reproductible.

Problématique

L'énergie, essentielle au développement agricole, permet l'irrigation, la mécanisation, la conservation, la transformation, l'hébergement d'hôtes et le fonctionnement de services administratifs. À Djidja, la précarité énergétique limite fortement le potentiel des fermes et compromet leur subsistance. Dès lors, une question clé émerge : comment résoudre le problème

énergétique par conception d'un système d'autonomisation durable, reproductible et adapté aux réalités techniques, économiques et environnementales d'une ferme agricole intégrée dans le contexte béninois ?

Méthodologie

L'étude adopte une approche pluridisciplinaire, combinant des méthodes qualitatives et quantitatives. Elle comprendra :

- une revue documentaire sur les modèles de fermes intégrées et les technologies d'énergie renouvelable applicables en milieu rural,
- une enquête de terrain à Djidja pour recueillir des données sur les pratiques agricoles, les besoins énergétiques et la vision des exploitants,
- une analyse technico-économique des solutions d'autonomisation énergétique implémentables (dimensionnement, coût, rentabilité, etc.).

Structure du mémoire

Le document est élaboré suivant six chapitres :

Chapitre I : Cadre théorique et conceptuel de l'autonomisation énergétique et de l'agriculture intégrée ;

Chapitre II : Diagnostic énergétique de la ferme ;

Chapitre III : Proposition d'un système d'autonomisation énergétique ;

Chapitre IV : Étude des coûts économiques ;

Chapitre V : Discussion et Analyses ;

Chapitre VI : Étude des impacts, limites et perspectives du modèle proposé.

Le développement du thème de mémoire « AUTONOMISATION ENERGÉTIQUE D'UNE FERME AGRICOLE A DJIDJA, BÉNIN » aura pour champs d'application, sens propre et sens figuré, la Ferme Intégrée Sadonou (FIS), un domaine d'un peu plus de vingt-six hectares, étendu entre le fleuve Couffo, une route de desserte Abomey-Djidja et de nombreuses autres fermes agricoles. La figure 1, représentée au chapitre 1, l'illustre.

I. CADRE THÉORIQUE ET CONCEPTUEL DE L'AUTONOMISATION ÉNERGÉTIQUE ET DE L'AGRICULTURE INTÉGRÉE

Partir d'une ferme agricole à faible rentabilité et aux défis multiples et aboutir à une exploitation agricole autonome en énergie par utilisation optimale de ses ressources nécessite d'exposer le cadre contextuel de recherche et de présenter par-delà un aperçu du secteur agricole au Bénin en général, à Djidja en particulier.

A. THEORIE ET CONCEPT DE L'AUTONOMISATION ÉNERGETIQUE

Il s'agit de présenter en général le contenu de la notion de l'autonomisation énergétique et de la contextualiser à la ferme agricole.

1. Définition de l'autonomisation énergétique

La théorie et le concept de l'autonomisation énergétique renvoient à l'ensemble des principes, approches et modèles visant à permettre aux individus, communautés ou entités comme les fermes ou les entreprises de produire, gérer et consommer leur propre énergie de manière durable, indépendante et résiliente. Cette autonomisation repose sur l'accès à des technologies appropriées (solaire, éolien, biogaz, etc.), sur la capacité à maîtriser les aspects techniques, économiques et organisationnels de la production énergétique, et sur la volonté de réduire la dépendance aux sources d'énergie centralisées ou fossiles. Elle s'inscrit dans une logique de transition énergétique et de développement durable, favorisant la souveraineté énergétique locale, l'inclusion sociale et la résilience face aux crises climatiques et économiques. L'autonomisation énergétique permet aux individus, ménages, communautés ou structures comme les exploitations agricoles de satisfaire leurs besoins énergétiques de manière durable, fiable et indépendante, tout en réduisant leur dépendance aux énergies fossiles et aux réseaux centralisés.

2. Objectifs et avantages de l'autonomisation énergétique

Les objectifs et avantages de l'autonomisation énergétique d'une ferme agricole sont multiples, on cite entre autres :

- réduire la dépendance vis-à-vis du réseau électrique national SBEE souvent instable, quand il existe,

- réduire les coûts liés à l'achat d'énergie (carburants, électricité, etc.) ou à l'acquisition du bois énergie dans les activités de cuisson, de chauffage, de pompage d'eau, d'utilisation de machines agricoles,
- renforcer la résilience énergétique face aux chocs (pannes, hausses régulières de prix),
- favoriser le développement local à travers une énergie adaptée aux besoins,
- réduire l'empreinte carbone par le recours aux sources renouvelables,
- promouvoir de nouveaux services tels que l'écotourisme par aménagements d'aires récréatives et de loisirs autour du monde paysan, de mise à disposition de chambres d'hôtes,
- revendre le surplus d'énergie non autoconsommée par injection sur le réseau ou revente directe aux fermes voisines.

L'autonomisation énergétique vise donc à renforcer la souveraineté énergétique, à améliorer la résilience économique et environnementale, à favoriser l'accès équitable à l'énergie, et à stimuler le développement local à travers l'utilisation de ressources renouvelables disponibles sur place. En somme, son objectif est de donner aux usagers le pouvoir de produire, contrôler et leur propre énergie tout en l'optimisant pour un développement durable et équitable.

En général, dans les exploitations agricoles et autres fermes intégrées, l'autonomie énergétique permet de répondre de façon efficiente aux besoins spécifiques des différentes unités : pompage pour l'irrigation, réfrigération pour la conservation, chauffage pour l'élevage et l'agro-alimentaire dans une perspective de résiliences économique et climatique.

3. Technologies d'autonomisation énergétique en milieu rural

a) L'énergie solaire

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus accessible au Bénin de par sa disponibilité et les coûts d'acquisition du matériel nécessaire à son exploitation. Elle fait recours à différentes technologies dont les plus utilisées sont :

- le séchage de grains et autres produits alimentaires par utilisation passive du rayonnement solaire,
- l'usage de panneaux photovoltaïques pour la production d'électricité à des fins d'éclairage, de réfrigération et conditionnement de denrées et autres produits agricoles transformés, de ventilation mécanique,
- les chauffe-eaux solaires pour les usages thermiques en cuisines et douches,
- les systèmes solaires hybrides intégrant des batteries ou des générateurs,
- les cuiseurs ou fours solaires.

Des différentes technologies supra énumérées, on note que leur modularité, leur facilité d'entretien et la baisse continue de leur coût d'acquisition les rendent particulièrement adaptées aux exploitations agricoles.

b) Le biogaz et la biomasse

La biomasse constitue une ressource énergétique abondante en milieu agricole. Les déchets organiques issus de l'élevage (fientes de volailles, bouses de bovins), de la transformation (résidus de culture), ou de la cuisine peuvent être valorisés pour produire :

- du biogaz, utilisé pour la cuisson ou la production d'électricité. Seule la première fait l'objet d'étude dans le présent mémoire,
- de l'énergie thermique par combustion directe,
- du compost, comme sous-produit utile à l'agriculture.

c) Micro-éolien et mini barrage hydroélectrique

Bien que moins fréquents, ces systèmes peuvent être pertinents dans certaines zones géographiques disposant de potentiel éolien ou hydraulique. Leur déploiement dépend fortement des conditions naturelles locales : le site de la Ferme Intégrée Sadonou, vaste domaine de plus de vingt-six hectares en bordure d'un fleuve pourrait s'y prêter.

B. CONCEPT DE FERME AGRICOLE INTEGREE

Cette notion permet d'accéder à la compréhension générale de l'autonomisation énergétique de la ferme agricole.

1. Définition

Une ferme agricole intégrée est une exploitation agricole où différentes activités sont organisées de manière complémentaire afin d'optimiser l'utilisation des ressources terre, eau, énergie, déchets, travail, fertilisants, divers inputs, … et de réduire les intrants externes. La ferme agricole intégrée Sadonou illustre un modèle d'exploitation durable qui combine plusieurs activités agricoles complémentaires. L'intégration concerne :

- la culture associée et la rotation des cultures,
- l'élevage intégré avec valorisation des déchets animaux,
- la pisciculture associée à l'irrigation et à l'agriculture,

- la transformation artisanale sur place des produits agricoles,
- le recyclage de tous les déchets.

L'objectif est de créer un écosystème productif fermé, économe, autonome, durable et à faible impact environnemental en optimisant les ressources en vue d'améliorer la productivité et d'assurer des gains financiers substantiels.

2. Fonctionnement d'une ferme agricole intégrée

a) Localisation et contexte agro écologique

Nos travaux se déroulent dans la commune de Djidja, 2184 km2 de superficie, située entre 7°10'0'' et 7°31'0'' de latitude Nord et entre 1°39'0'' et 2°13'0'' de longitude Est avec une population estimée à 168 000 habitants en 2024 (INStaD, 2024). On retient :

Localisation de la ferme : Latitude 7,2670044, longitude 1,8096103 ;

Village : Sawlakpa ;

Commune : Djidja ;

Région : Nord-Ouest du département du Zou ;

Pays : République du Bénin ;

Climat : Subéquatorial, avec deux saisons pluvieuses (avril-juillet et septembre-novembre) et deux saisons sèches (janvier-mars et novembre-décembre) ;

Sol : Ferrugineux tropical, propice à la culture du maïs, de tubercules, de légumineuses, de produits maraichers, d'essences fruitières, etc. ;

La figure 1 illustre la superficie du domaine agricole.

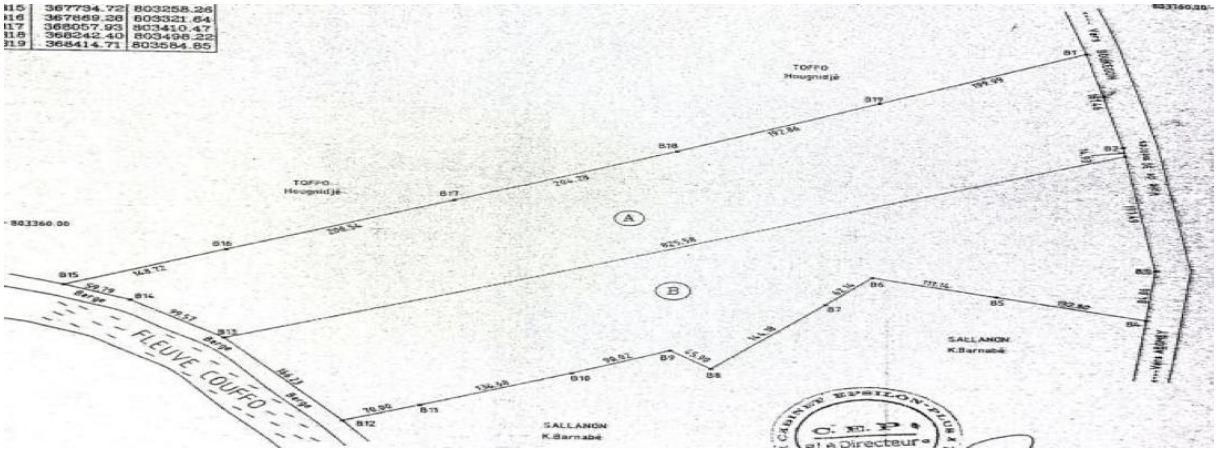


Figure 1: Cadastre du domaine de la ferme FIS

Source : Direction de FIS

b) Structure de la ferme

La ferme est organisée en plusieurs unités imbriquées. On note les principales :

- Unité de production végétale

Ses cultures principales sont le maïs, le manioc, le soja, le niébé, les fruits et légumes (tomates, piments, gombo et grandes morelles). Son système de production se base sur des cultures en rotation et association pour préserver la fertilité du sol. Elle promeut les pratiques durables par compostage des résidus organiques et un usage limité et ponctuel des intrants chimiques.

- Unité d'élevage

Elle pratique l'élevage de bovins et caprins pour la production de lait et de viande, l'élevage de porcins et l'aviculture (pintades, poulets de chair et pondeuses). L'alimentation animale est partiellement assurée par les sous-produits végétaux.

- Unité de pisciculture

Elle se compose d'étangs distincts de tilapias et de poissons-chats. Les eaux enrichies par les nutriments et déjections de poissons sont prioritairement utilisées comme fertilisant naturel pour l'irrigation pendant que des granulés ou paillettes composés entre autres de soja, de riz, de maïs enrichis aux vitamines servent de nourriture aux poissons.

- Unité de transformation

Elle opère la transformation du manioc en gari, du soja en lait de soja, du lait de vache en fromage ; elle transforme les régimes de noix de palme en huile rouge, les bananes plantains en chips et plusieurs autres activités génératrices de revenus (production de savons, transformation du cajou …). Cette unité gère le séchage et le conditionnement des produits. La valorisation locale des produits pour accroître leur valeur ajoutée est sa principale contribution.

- Unité de valorisation des déchets

Elle se concentre sur la production de compost à partir des déjections animales et végétales. Elle devra opérer le système de biogaz à petite échelle pour produire de l'énergie nécessaire à la cuisson et à la stérilisation de certains produits transformés. La réutilisation des eaux usées pour l'irrigation est envisagée.

- Unité Hébergement et Tourisme

C'est une unité en voie de création, elle devrait compter six (06) bungalows avec des chambres d'hôtes, un (01) restaurant, une (01) cuisine et des dépendances.

On compte par ailleurs, l'unité administrative chargée de diriger et coordonner toutes les activités de la ferme.

- Unité de Maintenance

En voie de création, elle devrait comporter deux équipes chargées, l'une, de la maintenance des équipements agricoles et industrielles et l'autre, de la maintenance des installations énergétiques et de l'injection du surplus de production d'énergie sur le réseau.

La distribution spatiale de la ferme relativement aux bâtiments, hangars et productions agricoles est illustrée ci-après.

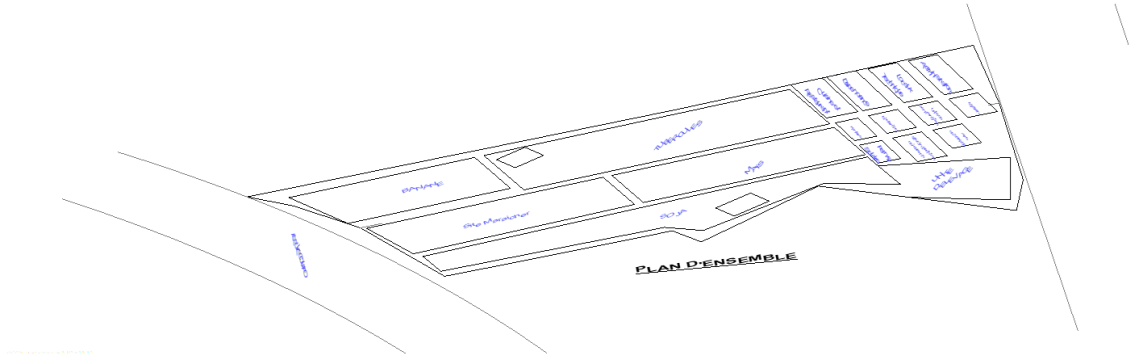


Figure 2 : Distribution spatiale de la ferme.
Source : Direction de FIS

c) Organigramme de la ferme et Occupation du domaine

L'organigramme est représenté ci-après. Certains postes, en couleur bleu dégradé sont à pourvoir après la phase réalisation du projet d'autonomisation énergétique de la ferme :

- Responsable Hébergement & Tourisme et les équipes y liées ;
- Responsable Maintenance et Gestion Énergétique et les équipes connexes.

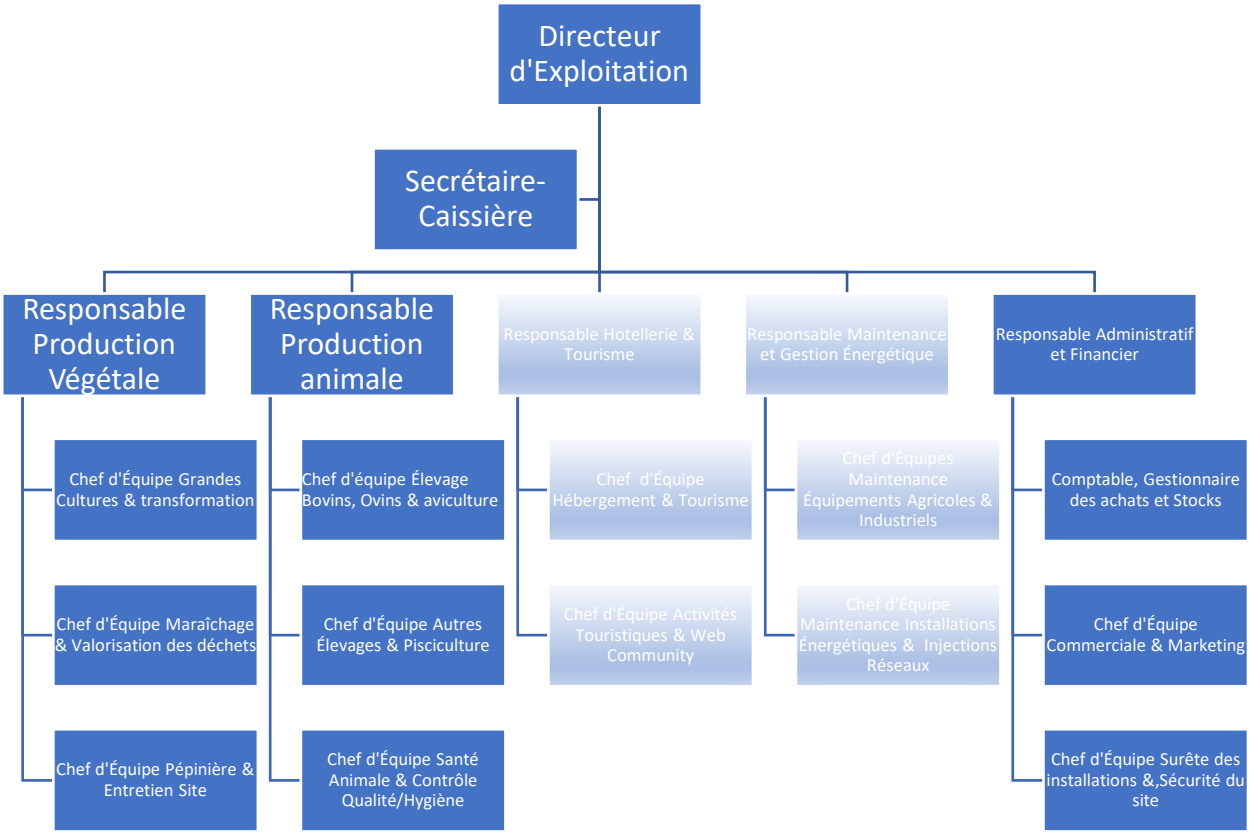


Figure 3 : Organigramme de la ferme FIS de Djidja
Source : Direction de FIS

d) Fonctionnement intégré et en circuit fermé

Les déchets de l'unité de production végétale servent à nourrir les animaux, les déjections animales fertilisent les champs et alimentent le bio digesteur, l'eau des bassins piscicoles fertilise les cultures maraîchères, L'énergie produite (biogaz, solaire, éolien) alimente les équipements de transformation et de production. L'approche intégrée permet :

- une valorisation maximale des sous-produits tels que le fumier, les eaux usées et autres résidus,
- une diversification des revenus pour l'exploitant,
- une meilleure résilience économique et écologique,
- une amélioration de la fertilité des sols et de la sécurité alimentaire,
- une pérennité du modèle économique.

Ce modèle s'adapte mieux aux petites et moyennes exploitations agricoles rurales à taille humaine comme celle faisant l'objet de notre étude.

3. Objectifs et impacts de la ferme FIS

Les objectifs visés par la ferme SADONOU sont les suivants :

- améliorer durablement la productivité agricole en impactant par son modèle la production locale,
- créer de la valeur ajoutée,
- réduire ou supprimer la dépendance énergétique externe et commercialiser le supplément produit,
- limiter les impacts environnementaux.

Quant aux incidences attendues sur le fonctionnement de la ferme, elles sont :

- une meilleure résilience face aux aléas climatiques,
- une croissance de la productivité agricole,
- une amélioration significative des revenus financiers.

C. INTERDEPENDANCE ENTRE ENERGIE ET AGRICULTURE INTEGREE

1. Les besoins énergétiques d'une ferme intégrée

Une ferme intégrée consomme de l'énergie pour diverses fonctions :

- Production : irrigation, semis mécanisés, élevage assisté ;
-Transformation : broyage, cuisson, séchage, pressage ;
- Conservation : réfrigération, séchage ;
- Services : éclairage, bureautique, communication, besoins résidentiels.

La qualité et la disponibilité de cette énergie conditionnent directement la productivité et la rentabilité des fermes mais aussi leur attractivité, notamment pour celles qui planchent pour le développement d'activités connexes génératrices de revenus comme l'écotourisme.

2. L'énergie comme levier de durabilité de l'activité agricole

L'utilisation d'énergie renouvelable au sein d'une ferme intégrée permet de réduire les coûts d'exploitation, de limiter l'usage de combustibles fossiles polluants, d'améliorer l'autonomie décisionnelle des exploitants agricoles et de réduire la vulnérabilité face aux crises énergétiques.

Ainsi, une ferme intégrée autonome en énergie peut être considérée comme un modèle de développement rural durable : le volet énergétique renforce la pérennisation de l'activité économique et améliore la résilience de l'exploitation agricole face à divers aléas.

D. APPROCHES THEORIQUES MOBILISEES

1. Approche systémique

Le présent mémoire s'inscrit dans une analyse par approche systémique de l'exploitation agricole, considérée comme un ensemble d'éléments interconnectés tels technologies, sols, cultures, animaux, énergie, humains. Cette approche permet d'évaluer les flux de matière et d'énergie au sein de la ferme et d'identifier les leviers d'optimisation.

2. Théorie de la résilience

La résilience désigne la capacité d'un système à absorber les chocs tout en maintenant ses fonctions essentielles. Appliquée à la ferme Sadonou, elle implique la capacité à s'adapter face à l'imprévisibilité climatique, aux fluctuations des coûts du marché et aux pannes énergétiques. L'autonomisation énergétique renforce cette résilience.

E. OBJECTIFS DU TRAVAIL ET HYPOTHESES DE RECHERCHE

1. Objectifs du travail

L'objectif général est d'étudier un système d'autonomisation énergétique dans une ferme agricole intégrée située à Djidja en vue d'améliorer sa productivité agricole, sa rentabilité financière et ses résiliences climatique et économique. De façon spécifique, il s'agit de :

- décrire le fonctionnement d'une ferme agricole intégrée dans le contexte local de Djidja et d'identifier les besoins énergétiques spécifiques de la ferme,
- évaluer les sources d'énergie renouvelable disponibles localement (solaire, biomasse, biogaz, etc.) et étudier la faisabilité technique du projet,
- analyser les impacts économiques et environnementaux de la solution déployée,
- proposer un modèle technico-économique d'autonomisation énergétique de ferme agricole.

2. Hypothèses de recherche

Ce travail repose sur les hypothèses suivantes :

H1 : Il est possible de couvrir la majorité des besoins énergétiques d'une ferme agricole intégrée à Djidja à partir de ressources renouvelables locales ;

H2 : L'autonomisation énergétique permet d'accroître la productivité et la rentabilité de la ferme tout en réduisant son empreinte écologique ;

H3 : Le modèle de passage de ferme intégrée conventionnelle à une ferme autonome en énergie peut être freiné par des contraintes liées aux coûts d'investissement, à la maintenance et à l'appropriation technologique par les acteurs locaux.

F. TECHNIQUES ET OUTILS DE COLLECTE DE DONNEES

Ils se résument comme suit :

- enquêtes et entretiens semi-directifs auprès des exploitants agricoles, des producteurs, les techniciens agricoles et autres associés, les structures décentralisées des services agricoles (ATDA) et d'énergie (SBEE) pour identifier les besoins énergétiques, les pratiques actuelles et les perceptions des divers acteurs,
- élaboration et remplissage des fiches de diagnostic énergétique pour mesurer les consommations, les pertes, les pics de charge, etc.,
- observation directe sur le terrain afin d'identifier les équipements utilisés et leur état,
- revue documentaire (rapports, articles, politiques nationales, manuels techniques …),
- utilisation d'outils de simulation et de dimensionnement énergétiques comme des tableurs Excel, et/ou les logiciels HOMER, PVsyst ou équivalents,

Une fois les données collectées, une analyse objective s'impose et les méthodes qui y aboutissent se résument comme ci-après :

- analyse descriptive des données recueillies,
- calculs de consommation et de rentabilité énergétique,
- évaluation multicritère des solutions techniques proposées (coût, fiabilité, maintenance, impact environnemental),
- proposition d'un modèle intégré sous forme de schéma fonctionnel ou de scénario de fonctionnement.

G. INTERETS DE L'ETUDE

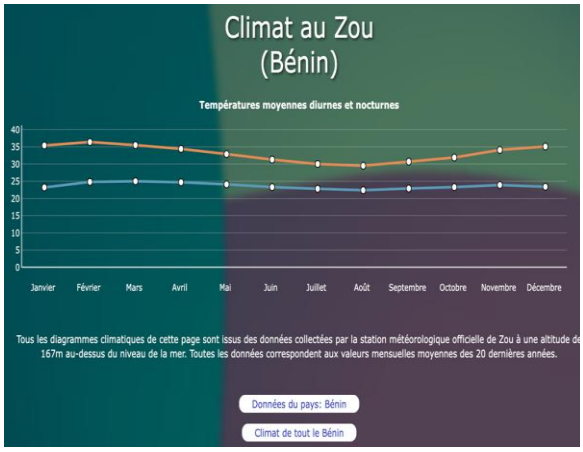
L'étude présente de multiples intérêts et vise à renforcer le vivier d'emplois pour les jeunes, à promouvoir des solutions aux enjeux nutritionnels, économiques et environnementaux tout en diffusant les savoir-faire en installation et maintenance des systèmes d'énergies renouvelables. Elle contribue par ailleurs, très modestement, à réduire le déficit énergétique du Bénin.

Sur le plan académique, le projet permet de relier la formation reçue à l'Institut 2IE aux réalités du terrain. Sur le plan personnel, il reflète la volonté d'allier passion agricole et entrepreneuriat local. Enfin, pour l'exploitant agricole, il représente une source de revenus supplémentaires et renforce la résilience de la ferme face aux changements climatiques et défis énergétiques.

II. DIAGNOSTIC ENERGETIQUE DE LA FERME

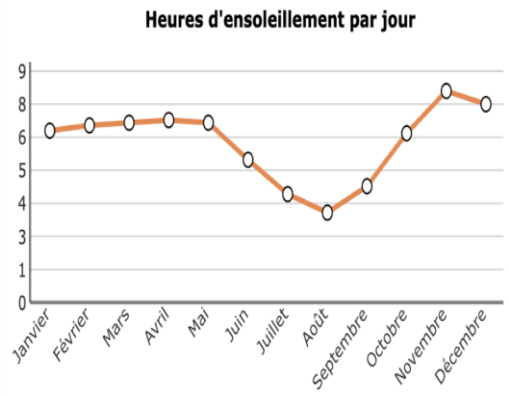
A. HYPOTHESES DE BASE

Les graphiques ci-après établissent respectivement les courbes de températures moyennes mensuelles, les heures d'ensoleillement par jour, le rayonnement solaire incident moyen par m^2 et la vitesse moyenne de vent du site. Ils introduisent partiellement les hypothèses de base des dimensionnements de divers systèmes qui composeront le mix énergétique de la ferme.



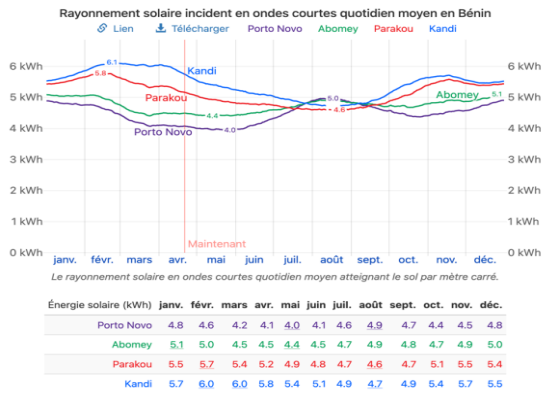
Graphique 1: Température Moyenne mensuelle

Sources : Site www.donnéesmondiales.com, 2024



Graphique 2 : Heures moyennes mensuelles ensoleillées

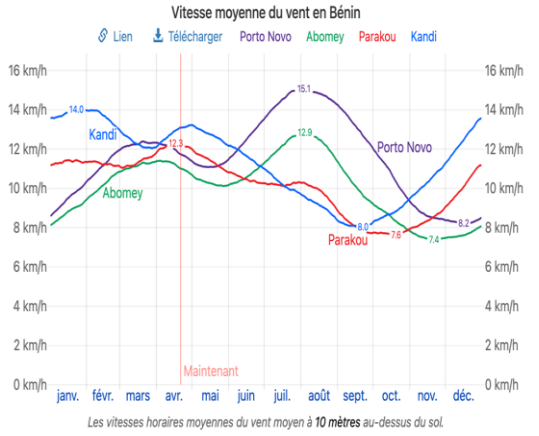
Sources : Site www.donnéesmondiales.com, 2024



Énergie solaire (kWh)	janv.	févr.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.
Porto Novo	4.8	4.6	4.2	4.1	4.0	4.1	4.6	4.9	4.7	4.4	4.5	4.8
Abomey	5.1	5.0	4.5	4.5	4.4	4.5	4.7	4.9	4.8	4.7	4.9	5.0
Parakou	5.5	5.7	5.4	5.2	4.9	4.8	4.7	4.6	4.7	5.1	5.5	5.4
Kandi	5.7	6.0	6.0	5.8	5.4	5.1	4.9	4.7	4.9	5.4	5.7	5.5

Graphique 4: Rayonnement solaire moyen mensuel incident

Sources : www.weatherspark.com, 2025



Graphique 3 : Vitesse du vent

Sources : www.weatherspark.com, 2025

Comme hypothèses de base, nous notons :

- Tension électrique d'usage : 230V/400V, Standard sur le réseau SBEE.
- Rayonnement solaire moyen incident : 5,2 kWh/m^2/j.
- Efficacité énergétique : Pertes minimales, on considère la puissance nominale des appareils.
- Nombre d'heures d'ensoleillement moyen journalier : 5,2 heures.
-Vitesse moyenne des vents à 10 m au-dessus du sol : 2,2-3,33 m/s. Données corroborées par le Global Wind Atlas, 2023 qui indique des vitesses moyennes de 3 – 4 m/s.

Le Mix énergétique de la ferme à l'entame de l'étude se compose :

- de deux groupes électrogènes de 13 kVA et 27 kVA, avec des coûts de maintenance liés à la main d'œuvre, aux achats de gasoil, d'huile moteur et autres consommables tels filtres et courroies etc.,
- un système de pompage d'eau par panneaux photovoltaïques,
- huit lampadaires solaires pour l'éclairage de la ferme,
- soixante (60) lampes économiques solaires alimentées par de petits panneaux PV isolés,
- cent trente-deux (132) stères de bois par an,
- trois (03) sacs de 40 kg de charbon en moyenne par mois, soit 1 440 kg par an,

Aussi, notons que :

- PCI moyen du bois = 1700 kWh /m^3 (www.proxi-totalenergies.fr)
- PCI moyen du charbon de bois = 9 kWh/kg
- 1 stère de bois, équivaut sensiblement à 0,8 m^3 de bois (www.onf-energie-bois.fr)

B. IDENTIFICATION DES BESOINS ENERGETIQUES

1. Calcul des consommations énergétiques par unité

Les besoins énergétiques spécifiques de la ferme SADONOU sont les suivants, besoins courants actuels et besoins projetés. Nous les résumons dans le tableau 1 ci-après.

Tableau 1: Bilan des consommations journalières d'énergie

Ordre	Contenu	Qté Énergie brute (kWh/j)	Qté Énergie nette (kWh/j)	Consommation de jour (kWh/j)	Consommation de nuit (kWh/j)
1	Production Végétale	19,6	16,4	16,40	0
2	Élevage	16,05	12,93	7,05	5,88
3	Pisciculture	9,8	7,59	3,16	4,43
4	Transformation Artisanale	568,94	158,2	152,60	5,60
Total brut charges existantes		**614,39**	**195,12**	179,21	15,91
5	Écotourisme (Cuisine, restaurant et buanderie)	63,26	49,46	27,5	21,96
6	Écotourisme (hébergement)	60,24	23,64	13,35	10,29
7	Bureau et Administration (Accueil, salles de sports, dépendances diverses)	33,96	18,12	18,12	0
Total brut nouvelles charges		**157,46**	**91**	58,97	32,25
BESOINS GLOBAUX		**771,85**	**286**	238,18	48,16

Source : Enquête de terrain et archives de FIS

Ce tableau résume tous les besoins en énergie à l'exception de :

- l'énergie consommée par les projeteurs et lampadaires solaires prévus par acquisition complémentaire en kits indépendants pour l'éclairage du domaine,

- l'énergie nécessaire au fonctionnement des tracteurs, qui pour des raisons d'économie d'échelle rouleront toujours au gasoil. Il sera en effet contre-productif de fabriquer du biodiesel uniquement pour quelques engins.

Le tableau détaillé équivalent se trouve à l'annexe I du présent document.

Ainsi, le déficit énergétique à combler sur la ferme Sadonou est de 286 kWh/j. En tenant compte d'une marge de sécurité et d'extension de 10% du fait de futurs travaux et divers aléas, les besoins à couvrir par les investissements dans les énergies renouvelables sont en kWh/j de 314,6.

2. Adéquation entre activités agricoles et sources d'énergie

Le tableau 2 établit les correspondances entre les activités agricoles et les sources d'énergie les plus à même de satisfaire ses besoins. Sources d'énergie que nous corrélerons plus tard avec le potentiel du site.

Bien que la biomasse soit disponible en quantité suffisante, elle sera volontairement délaissée dans sa composante bois-énergie afin de limiter l'empreinte carbone du site, mais elle contribuera partiellement à la production de biogaz. Nous étudierons le mix énergétique le plus rentable économiquement et qui présente le plus grand potentiel sur le site. Le tableau ci-dessous permet d'évaluer les besoins en électricité et de planifier les solutions énergétiques adaptées.

Tableau 2 : Tableau de correspondance entre activités agricoles et sources d'énergie

N°	Contenu	Équipements	Puissance Nominale (W)	Qté	Énergie brute kWh/j	Énergie nette kWh/j	Consommation de jour	Consommation de nuit	Source d'Énergie Renouvelable Envisagée		
1	Production Végétale	Pompe d'irrigation	1200	1	9,6	7,2	7,2	0	Solaire PV	Éolienne	Hydro-électricité
		Tracteurs et Outillages divers (Poste à souder, chargeur batteries, perceuse, pierre à meuler …)	1500	1	6	6	6	0	Solaire PV	Éolienne	Biocarburant

		Broyeur de végétaux	2000	1	4	3,2	3,2	0	Éolienne	Biocarburants	
		Total Production végétale			19,6	16,4	16,4	0			
2	Élevage	Broyeur d'aliments	1500	1	3	2,4	2,4	0	Éolienne	Biocarburants	
		Ventilation	50	12	7,2	5,76	2,4	3,36	Solaire PV	Éolienne	Hydro-électricité
		Éclairage (LED)	10	30	3,6	2,52	0	2,52	Solaire PV	Éolienne	Hydro-électricité
		Pompe à eau (Abreuvoir)	750	1	2,25	2,25	2,25	0	Solaire PV	Éolienne	Hydro-électricité
		Total Élevage			16,05	12,93	7,05	5,88			
3	Pisciculture	Pompe à Air	800	1	4,8	3,84	1,6	2,24	Solaire PV	Éolienne	Hydro-électricité
		Pompe de filtration	1000	1	5	3,75	1,56	2,19	Solaire PV	Éolienne	Hydro-électricité
		Total Pisciculture			9,8	7,59	3,16	4,43			
4	Transformation Artisanale	Moulin à céréales	3000	1	24	19,2	19,2	0	Éolienne	Biocarburants	
		Torréfaction gari	_	En s.	527,3	123	123	0	Solaire Thermique		
		Fabrication de jus de fruits	_						Solaire Thermique		
		Autres activités	_						Solaire Thermique		
		Séchoir électrique	2000	1	8	6,4	6,4	0	Solaire Thermique		

		Réfrigérateur/Congélateur	200	2	9,6	9,6	4	5,6	Solaire PV	Éolienne	
		Total Transformation artisanale			568,9	158,2	152,60	5,6			
Total charges brutes existantes					614	195	179,21	15,91			
5	Écotourisme (Cuisine, restaurant et buanderie)	Prises dédiées	1200	2	14,4	3,6	1,5	2,1	Solaire PV	Éolienne	Hydro-électricité
		Éclairage (LED)	200	1	2,4	1,2	0,5	0,7	Solaire PV	Éolienne	Hydro-électricité
		Réfrigérateur (Cuisine)	150	2	7,2	7,2	3	4,2	Solaire PV	Éolienne	Hydro-électricité
		Cuisine	–	–	16,46	16,46	12,35	4,11	Biogaz		
		Congélateur	350	2	16,8	16,8	7	9,8	Solaire PV	Éolienne	Hydro-électricité
		Machine à laver 8 kg	1200	1	2,4	2,4	2,4	0	Solaire PV	Éolienne	Hydro-électricité
		Ventilateurs	50	6	3,6	1,8	0,75	1,05	Solaire PV	Éolienne	Hydro-électricité
		Total Cuisine, rest. & buanderie			63,26	49,46	27,5	21,96			
6	Écotourisme (hébergement)	Prises Électriques (TV, décodeurs, smartphones, Woofers)	150	12	21,6	7,78	5,83	1,94	Solaire PV	Éolienne	Hydro-électricité
		Éclairage (LED)	70	6	5,04	3,02	1,26	1,76	Solaire PV	Éolienne	Hydro-électricité
		Ventilateurs	50	4	2,4	1,2	0,50	0,70	Solaire PV	Éolienne	Hydro-électricité

		Climatiseurs	800	2	19,2	7,68	5,76	1,92	Solaire PV		
		Chauffe-eau électrique	1000	6	12	3,96	0	3,96	Solaire Thermique		
		Total hébergement			60,24	23,64	13,35	10,29			
7	Bureau & Adminis. (Accueil, salles de sports, dépendances diverses)	Prises Électriques (TV, Ordinateurs, décodeurs, smartphones, Woofers)	200	12	28,8	13,824	13,82	0	Solaire PV	Éolienne	Hydro-électricité
		Éclairage (LED)	10	36	2,16	1,30	1,30	0	Solaire PV	Éolienne	Hydro-électricité
		Surpresseur électrique	750	1	3	3	3	0	Solaire PV	Éolienne	Hydro-électricité
		Total Bureau & Administration			33,96	18,12	18,12	0			
8	Éclairage Ext.	Projecteurs solaires	50	22	0	_					
Total nouvelles charges brutes					158	91	58,97	32,25			
BESOINS GLOBAUX BRUTS					772	286	238	48			

Source : Enquête de terrain et archives de FIS

C. LCOE DES ENR EXPLOITABLES SUR LE SITE

1. LCOE du solaire PV, de l'éolien et de l'hydroélectricité

Le tableau 3 ci-après, retrace les coûts de production, LCOE de diverses énergies renouvelables à travers le monde entre 2010 et 2023, données compilées par l'IRENA.

Tableau 3: Tendance Coût total installé, facteur de charge et LCOE par technologie

	Couts totaux installes (2023 USD/kW)			Facteur de charge (%)			Cout actualisé de l'énergie (2023 USD/kWh)		
	2010	2023	Variation en pourcentage	2010	2023	Variación	2010	2023	Variation en pourcentage
Bioénergie	3 010	2 730	-9%	72	72	0%	0.084	0.072	-14%
Géothermie	3 011	4 589	52%	87	82	-6%	0.054	0.071	31%
Hydroélectricité	1 459	2 806	92%	44	53	20%	0.043	0.057	33%
Solaire photovoltaïque	5 310	758	-86%	14	16	14%	0.460	0.044	-90%
CSP	10 453	6 589	-37%	30	55	83%	0.393	0.117	-70%
Éolien terrestre	2 272	1 160	-49%	27	36	33%	0.111	0.033	-70%
Éolien en mer	5 409	2 800	-48%	38	41	8%	0.203	0.075	-63%

Note : kW = kilowattheure ; CSP = énergie solaire à concentration ; kW = kilowatt.

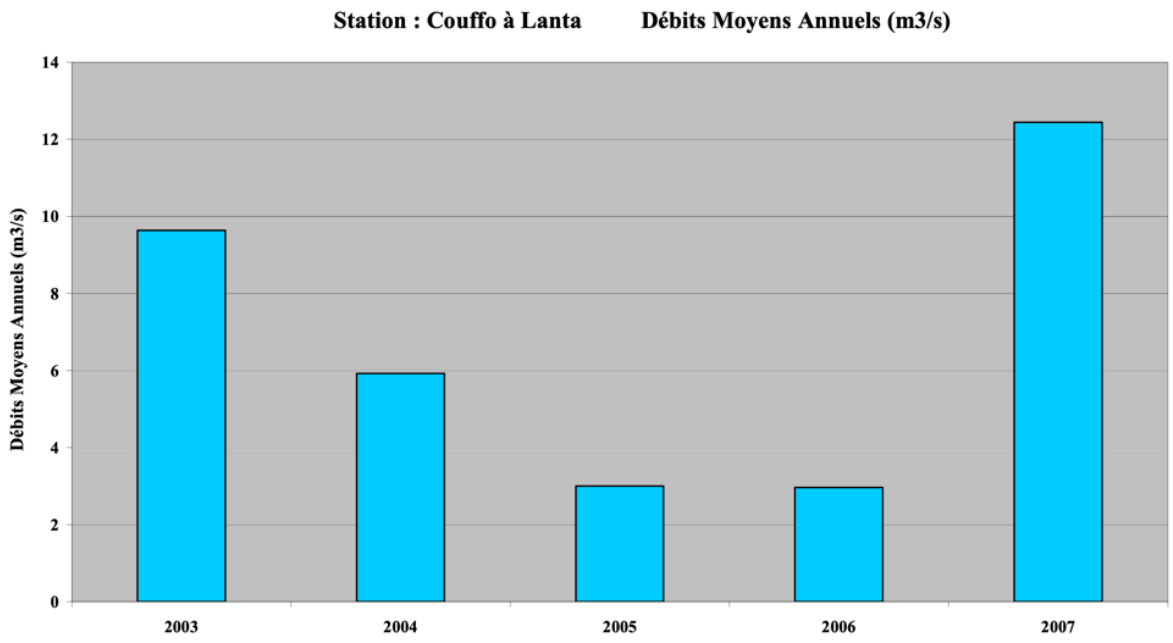
Source : IRENA, Résumé des Coûts de Production d'EnR en 2023.

Du tableau, nous retenons des LCOE de : 0,033 USD pour l'éolien terrestre ; 0,044 USD pour le solaire photovoltaïque et 0,057 USD pour l'hydroélectricité.

Les coûts de production actualisés du kWh d'énergie hydroélectrique sont attractifs mais moins compétitifs encore qu'ils sont en hausse par rapport à 2010. Aussi, la faisabilité technique d'un projet hydroélectrique bute sur quelques contraintes majeures à savoir :

- la très grande variabilité du débit du fleuve Couffo qui borde la ferme et dont la moyenne est comprise entre 2,96 et 12,4 m³/s comme l'illustre le graphique 5 ci-après.
- le faible débit moyen,
- la saisonnalité de la disponibilité de l'eau de Juin à Octobre,
- la faible profondeur d'eau du Couffo dans la zone de la ferme. Cette faible dénivellation et le faible débit moyen limitent la production d'hydroélectricité,
- les péripéties d'ordre juridique puisque l'érection d'un micro-barrage nécessite de nombreuses autorisations administratives gouvernementales ainsi que de couteuses études d'impact environnemental.

Cette source d'énergie, bien que disponible ne sera pas retenue pour ces contraintes importantes, et ne contribuera donc pas au mix énergétique à implémenter sur la ferme SADONOU.



Graphique 5: Débit moyen annuel du fleuve Couffo
Source : Météo Bénin, Annales hydrologiques des années 2003 à 2007, Sept 2008.

2. LCOE DES BIOENERGIES

Le tableau 3 indique une valeur moyenne de 0,072 USD/kWh comme LCOE des bioénergies, un coût compétitif qui mérite exploration.

a) LCOE du Biodiésel

Le biocarburant n'est nécessaire qu'au fonctionnement du tracteur, des moulins et autres engins agricoles. Il s'agit en particulier du biodiesel, son usage induirait :

- des adaptations sur les moteurs existants et donc des surcouts,
- une maintenance distincte de celle conventionnelle appliquée aux engins couramment utilisés,
- de nouveaux investissements par adoption de moteurs de catégorie 3/Phase III A et de catégorie inférieure pouvant utiliser jusqu'à 100 % de biodiesel,
- une compétition entre la biomasse nécessaire à la production du biodiesel et l'alimentation humaine.

Les arguments supra-évoqués plaident peu en faveur de ce carburant au vu de la surface disponible à exploiter, environ 26 ha. Ces contraintes techniques et économiques plomberaient le projet en

alourdissant les investissements sans garantie de rentabilité. Le biodiesel s'exclut du mix énergétique.

b) LCOE du Biogaz

La biomasse à valoriser est issue des déchets d'aviculture, de déjections de porcs et vaches, des produits maraîchers avariés, et autres résidus de transformation disponibles in situ. Le biogaz contribue ainsi à l'agriculture circulaire et sera maintenu dans son usage de production de chaleur pour la cuisson au restaurant.

D. SOURCES D'ENERGIE A EXPLOITER

Les sources énergétiques exploitables du site abritant la ferme SADONOU se résument après analyse et étude sommaire des coûts et contraintes techniques en le solaire photovoltaïque, le solaire thermique, l'éolien et le biogaz.

1. Forces et faiblesses des sources d'énergie exploitable

Le tableau 4 ci-après résume les différentes sources d'énergie à exploiter sur le site, expose la technologie à déployer et met en exergue, les avantages et inconvénients de chaque source.

Tableau 4:Sources d'énergies à exploiter

Contenu	. Énergie solaire	Énergie éolienne	Biogaz
Type	Énergie renouvelable issue du rayonnement solaire	Énergie cinétique du vent convertie en énergie mécanique puis électrique	Gaz renouvelable issu de la méthanisation (fermentation anaérobie) de matières organiques (lisier, fumier, résidus agricoles, etc.)

Technologies	Panneaux photovoltaïques (électricité), capteurs thermiques (chauffage/eau chaude)	Petites éoliennes horizontales ou verticales	Digesteurs anaérobies avec prétraitement (broyage, hygiénisation) et épuration (désulfuration)
Forces/ Avantages	Ressource abondante	Ressource abondante	Valorisation des déchets : Réduction des émissions de méthane naturel (effet de serre)
	Faible coût d'exploitation	Faible impact environnemental.	Réduction de la dépendance aux énergies fossiles.
	Déploiement non complexe	Bon complément à l'énergie solaire, en effet les forces de vent la nuit et par mauvais temps sont souvent plus élevées qu'en journée et par beau temps	Fertilisants naturels : Le digestat (résidu de méthanisation) est un excellent engrais.
	Installation modulable	Revenus supplémentaires : Vente d'électricité,	Revenus supplémentaires : Vente d'électricité, de chaleur ou de biométhane.
	LCOE en baisse année après année	LCOE en baisse année après année	Réduction des odeurs (digestion anaérobie limite les émissions malodorantes)
	Réduction de la dépendance aux énergies fossiles		

Faiblesses/ Inconvénients	Production intermittente, dépend de la météo Rendement limité, 15 à 22 % pour les panneaux photovoltaïques classiques	Production variable, dépend de la vitesse du vent Bruit et encombrement visuel	Investissement initial élevé (coût des digesteurs, systèmes de purification) Maintenance technique nécessaire (gestion des bactéries méthanogènes, contrôle des gaz corrosifs)
	Besoin de stockage sur batteries pour une utilisation continue.	Nécessite des vitesses de vent suffisantes ≥ 2-3 m/s pour petites éoliennes.	Variabilité de la production (dépend de la qualité et de la quantité des intrants)
	Coût initial élevé lié aux équipements solaires tels panneaux, batteries et onduleurs.	Les coûts d'installation et de maintenance des éoliennes peuvent être élevés, surtout dans des zones éloignées ou difficiles d'accès.	Risques sanitaires si le digestat n'est pas bien traité
	Maintenance due aux températures élevées pouvant affecter la performance des panneaux solaires, nécessitant un suivi régulier pour assurer une efficacité optimale	Le développement de l'énergie éolienne nécessite une infrastructure adaptée, notamment pour le transport et l'installation des équipements, ce qui représente souvent un défi logistique	Émissions résiduelles (CO_2, H_2S) si l'épuration est insuffisante
	Manque d'infrastructure de soutien tels des réseaux de distribution adaptés et l'absence de législation incitative à l'investissement dans ces énergies renouvelables		
Facteur de charge (%)	16	36	72

Source : www.irena.org, Avril 2025, Notes de cours 2iE 2021-2022

2. Synergie solaire-éolien à Djidja

Alors que le solaire constitue la source principale d'énergie renouvelable au vu du tableau 2, l'éolien, bien que plus faible, peut être utilisé en appoint, notamment pour couvrir certaines périodes comme les nuits et les jours et heures de faible ensoleillement.

Un système hybride solaire-éolien permettra une meilleure fiabilité de l'approvisionnement énergétique, il sera privilégié autant que faire se peut dans la suite de l'étude.

E. ANALYSE DES FORCES ET FAIBLESSES DU PROJET

Nous analyserons les forces et faiblesses du projet afin d'en cerner les contours, il importe d'en tenir compte pour accroître les facteurs de succès et minimiser les risques.

1. Analyse SWOT

Cet outil stratégique permet d'identifier les forces, faiblesses, opportunités et menaces du projet en cernant mieux les facteurs entrant en jeu dans la prise de décision ou dans l'élaboration de la stratégie commerciale. On le résume comme ci-après.

Tableau 5 : Analyse SWOT du projet

	STRENGHTS (Forces).	WEAKNESSES (Faiblesses)
Origine Interne (Organisationnelle)	Ressources naturelles abondantes Potentiel solaire important Possibilité d'éoliennes de petite taille avec une présence de vents modérés Disponibilité de déchets agricoles et animaux, biomasse pour biogaz Technologies adaptées et durables Systèmes solaires photovoltaïques pour l'électricité Chauffe-eau solaire pour réduire la consommation de bois. Séchoir solaire pour la conservation des produits agricoles. Méthanisation pour la production d'énergie et d'engrais Réduction des coûts énergétiques à long terme	Investissement initial élevé Coût des panneaux solaires, éoliennes et digesteurs de biogaz Nécessité de subventions ou de crédits pour les exploitants agricoles Maintenance technique nécessaire Besoin de compétences locales pour la réparation des équipements Risque de panne en cas d'absence de formation Variabilité des ressources naturelles L'énergie solaire est intermittente (nuit, saison des pluies). L'éolien dépend de la vitesse du vent (potentiel moyen à Djidja) Acceptation culturelle et habitudes locales
	Diminution de la dépendance au diesel et au réseau national Économies sur les dépenses en énergie fossile et en charbon de bois. Valorisation des déchets agricoles Économie circulaire par transformation des résidus en biogaz et en compost Amélioration de la productivité agricole Meilleure conservation des récoltes, séchage solaire Irrigation assistée par énergie renouvelable Soutien gouvernemental et international Politiques béninoises favorables aux énergies renouvelables Possibilité de financements (FAO, PNUD, Banque Mondiale, etc.).	Résistance au changement car préférence des méthodes traditionnelles Méconnaissance des avantages du biogaz et des séchoirs solaires Capacité de stockage d'énergie limitée Batteries coûteuses pour le solaire Difficulté à maintenir une alimentation constante

	OPPORTUNITIES (Opportunités)	THREATS (Menaces)
Origine Externe (Environnementale)	Marché croissant des énergies renouvelables en Afrique Appui des ONG et partenaires techniques tels le GIZ, l'UE, etc.	Instabilité politique ou économique Changement de politiques énergétiques défavorables
	Innovations technologiques moins chères, baisse des prix du solaire Développement économique local Création d'emplois (installation, maintenance, gestion des systèmes) Amélioration des revenus agricoles grâce à une meilleure transformation. Politiques et incitations financières Subventions pour les énergies propres (Programme National Biogaz Bénin) Tarifs préférentiels pour les équipements renouvelables Exportation des surplus d'énergie Possibilité de revendre l'électricité excédentaire par déploiement de mini-réseaux Renforcement de la résilience climatique Réduction de l'empreinte carbone de la ferme Moins de dépendance aux énergies fossiles, Adaptation aux changements climatiques	Inflation ou fluctuation des coûts des équipements importés Concurrence des énergies fossiles subventionnées Le kérosène et le gaz butane restent accessibles prix modérés Défis logistiques et d'approvisionnement Difficulté à importer des pièces détachées (retards, douanes) Risques climatiques extrêmes Tempêtes ou vents violents pouvant endommager les installations Saison des pluies réduisant l'efficacité du solaire

De ce tableau 5, on retient qu'en adoptant une bonne planification technico-financière, le système intégré pourra servir de modèle à d'autres fermes au Bénin, voire au-delà.

2. Analyse PESTEL

Il s'agit d'analyser les principales tendances d'évolution politico-légale, économique, socioculturelle, technologique, environnementale, infrastructurelle et logistique. C'est un outil complémentaire au SWOT, qui se concentre uniquement sur les facteurs externes pouvant influencer le projet.

Tableau 6 : Analyse PESTEL du projet

POLITIQUE	**Menace**	**Opportunité**
Soutien du gouvernement béninois aux énergies renouvelables (Stratégie Nationale Énergie)		X
Projets Régionaux CEDEAO, pour l'accès à l'énergie en milieu rural		X
Instabilité politique potentielle liée aux élections générales de 2026	X	
Lenteurs administratives pour les subventions ou autorisations	X	
Absence d'associations représentatives de promoteurs de projet d'énergies renouvelables	X	
ECONOMIQUE		
Réduction des coûts énergétiques à long terme		X
Création d'emplois locaux (installation, maintenance)		X
Stabilité du franc CFA		X
Financements possibles FAO, ONG		X
Investissement initial élevé	X	
Fluctuation des prix des équipements importés	X	
Faible pouvoir d'achat local pour réplication du modèle	X	
SOCIO-CULTURELLE		
Amélioration des conditions de vie (électricité, cuisson propre)		X
Formation des populations aux technologies d'énergies renouvelables.		X
Valorisation des déchets agricoles (méthanisation)		X
Résistance au changement (habitudes de consommation)	X	
TECHNOLOGIQUE		
Potentiel solaire élevé		X
Importation de technologies photovoltaïques et éoliennes	X	
Innovations locales adaptables (Séchoir solaire et chauffe-eau low cost)		X

Maintenance complexe des système hybrides PV + éolien	X	
Partenariat avec Instituts de recherche		X
Accès limité à des techniciens qualifiés en énergies renouvelables et maintenance des systèmes électriques	X	
Coût, disponibilité, fiabilité des technologies chinoises à déployer		X
ENVIRONNEMENTALE		
Réduction des émissions de CO_2 et remplacement du charbon par le Biogaz	X	
Gestion durable des déchets organiques		X
Préservation des sols (moins de déforestation)		X
Risque de pollution si mauvaise gestion du bio digesteur	X	
Dépendance aux conditions climatiques (ensoleillement/vent)	X	
LEGALE		
Cadre réglementaire favorable (lois existantes sur les énergies renouvelables)		X
Exonérations fiscales pour les équipements verts		X
Normes techniques strictes pour les installations		X
Absence de cadre juridique libéralisant la production/vente d'énergie	X	
Conflits fonciers possibles pour l'implantation des infrastructures	X	

Source : Autoproduction

En termes de synergies, le projet s'aligne sur les Objectifs de Développement Durable (ODD 7 et 13) et les priorités nationales. De plus, il présente comme défis majeurs le financement initial et la formation des acteurs locaux pour assurer sa pérennité. Il nous sera utile d'intégrer une phase pilote avec suivi-évaluation pour ajuster de façon précise, les technologies aux besoins réels.

III. PROPOSITION D'UN SYSTEME D'AUTONOMISATION ENERGETIQUE (DIMENSIONNEMENT, FAISABILITE ET MAINTENANCE)

L'analyse des besoins énergétiques de la ferme repose sur les consommations journalières nettes des différentes activités. Le dimensionnement de chacune des sources d'énergie retenues tient compte des usages courants et des extensions projetées.

A. DIMENSIONNEMENT ET CHOIX DES COMPOSANTES

1. Dimensionnement et choix du système solaire photovoltaïque

Du tableau de l'annexe II, il ressort que le besoin à couvrir par les installations PV est de 106 kWh/j. Nous devons en déduire les 7,2 kWh/j du pompage solaire, une installation déjà mise en place et opérationnelle, ensuite corriger la consommation nette obtenue par un coefficient de sécurité et d'extension de 1,1. Le rapport de la consommation énergétique de nuit sur 24 heures représentera donc d'après le même tableau : 44/98,2 = 44,81%

Nous obtenons ainsi un besoin à couvrir par le système PV de 108,68 kWh/j. Nous retiendrons pour la suite, 110 kWh/j.

Ainsi le dimensionnement d'un système photovoltaïque pour couvrir le besoin projeté de la ferme FIS à Djidja intègre les hypothèses suivantes comme paramètres de conception :

Besoin énergétique quotidien : 110 kWh/j

Ensoleillement moyen : 5,2 kWh/m²/an, « *Global Solar Atlas, 2021* »

Nombre moyen d'heure d'ensoleillement par jour : 6,2 heures suivant graphique 1,

Type de batterie : Lithium-ion, pour ces avantages. Confère tableau annexe III.

Température moyenne : 25–35 °C

DoD : 80 %. Bien qu'à priori élevé et contre intuitif dans un dimensionnement, il se justifie par le couplage envisagé avec l'éolien dont l'énergie produite en excès vient en complément pour la recharge des batteries grâce à un kit de couplage. L'avantage de batterie en recharge même la nuit ou par temps nuageux vient donc renforcer la disponibilité de l'énergie, accroître l'autonomie et réduire par la même occasion le pack de batterie réellement nécessaire. Toutefois l'objectif de vente du surplus d'énergie nous fait maintenir les critères précédents de conception

du champ photovoltaïque. On souligne aussi que DoD = 80% est aussi une valeur propre aux batteries lithium.

Autonomie : Couverture des charges nocturnes

Tension système : 48 V

Rendement global moyen du système ou ratio de performance : 0,75-0,80 « NREL, 2021 ».

Ce ratio de performance tient compte des pertes incluant l'onduleur, les câbles, les batteries, indépendamment de l'irradiation ou de la puissance crête des modules.

a) Calcul de la Puissance Crête (Pc) du Champ Photovoltaïque

$$Pc\ (kWc) = \frac{Besoin\ \ Energétique\ quotidien\ (kWh)}{Ensoleillement\ x\ Rendement\ système}$$

$$Pc\ (kWc) = \frac{110\ kWh}{6{,}2\ h\ x\ 0{,}75} = 23{,}66\ kWc$$

La puissance crête calculée P_c du champ photovoltaïque est égale à 23,66 kWc.

b) Spécifications techniques des panneaux

Nombre N_p de Panneaux photovoltaïques de 605 Wc :

$$Np\ = \frac{23{,}66\ kWc}{0{,}605\ kWc/panneau} = 39{,}11$$

Le nombre de panneaux photovoltaïques à installer est 40. Nous choisissons des panneaux bifaciaux, TOPcon pour l'efficacité de ce type de module et le rapport qualité/prix. Les spécifications sont indiquées en annexe IV et le nombre de strings à monter est fonction des caractéristiques de l'onduleur hybride : tension, intensité, puissances input et output.

Au vu des spécifications des panneaux photovoltaïques, nous optons pour 04 strings de 10 panneaux. Chacun des strings aura les caractéristiques suivantes : 458 V ; 13,22 A.

c) Dimensionnement et configuration des batteries

Des deux technologies de batteries NMC (Nickel-Manganèse-Cobalt) et LFP (Lithium-Fer-Phosphate), nous optons pour le LFP, plus courant, avec une plus grande longévité, une sécurité accrue et surtout des coûts potentiellement plus faibles même si elles ont une moindre densité énergétique que le NMC. Nous retenons des Batteries 12V/250Ah LiFePO4.

- Le dimensionnement des batteries tient compte de l'énergie à stocker de nuit correspondant à l'autonomie projetée. Cette énergie équivaut à 44,81% des 110 kWh/j, soit 49,29 kWh. Notons que 44,81% est la proportion d'énergie consommée de nuit au regard du tableau de l'annexe II.

Capacité utile C_{batt} des Batteries (DoD = 80%) : $\text{Cbatt} = \frac{Energie\ à\ stocker}{DoD}$

$$\text{Cbatt} = \frac{49{,}29\ kWh}{0{,}8} = 61{,}62\ \text{kWh}$$

Capacité C_{Ah} en Ah (Tension 48 V) : $CAh = \frac{61{,}62\ kWh\ x\ 1000}{48\ V} = 1283{,}59\ Ah$

La capacité en Ah requise pour les batteries est sensiblement égale 1284 Ah.

- La Configuration des batteries quant à elle, tient compte des spécifications des strings et de la configuration de l'onduleur.

- Série : 4 batteries seront montées en série, pour obtenir 48V par string
- Parallèle : 6 strings, chacun de 4 batteries sont à monter en parallèle.

Soit au total : 4 x 6 = 24 batteries de 12V, 250 Ah.

Ainsi la capacité réelle de batterie à installer est de : 250 Ah x 6 = 1500 Ah, soit une puissance installée de 72 kWh.

d) Sélection de l'onduleur et des régulateurs

L'onduleur a pour rôle de transformer le courant continu provenant des batteries ou des panneaux en courant alternatif. Sa puissance nominale doit correspondre à la formule :

$$Puissance\ nominale \geq \frac{Besoin\ Energétique\ \ moyen\ journalier}{24h}$$

$$Puissance\ nominale \geq \frac{Énergie\ solaire + \ Énergie\ éolienne}{24h}$$

$$Puissance\ nominale \geq \frac{110\ kWh + 23{,}32\ kWh}{24h}$$

$$Puissance\ nominale \geq 5{,}56\ kW$$

La plage de fonctionnement optimal d'un onduleur correspond à 75% de sa pleine capacité, nous pourrions choisir un onduleur de puissance immédiatement supérieure à 6,95 kW. Le catalogue fournisseur dont une partie des offres est indiquée en annexe V nous propose un onduleur de 8 kW, soit 10 kVA avec la fonction régulation MPPT incorporée.

Toutefois, la puissance nominale ainsi calculée ne suffit pas à déterminer toutes les autres spécifications de l'inverter hybride. Il nous faut en plus considérer :

- un onduleur hybride disposant d'input DC pour panneaux mais aussi AC pour l'éolienne et les groupes électrogènes, initialement en place au début du projet.
- un nombre d'entrées de strings de panneaux en adéquation avec la capacité du champ photovoltaïque, chaque panneau PV ayant les caractéristiques tension courant Vmax = 45,8 V et I_{max} = 13,22 A comme indiqué à l'annexe IV.
- 40 panneaux répartis en 4 strings de 10 panneaux, chaque string a donc sensiblement les caractéristiques tension et intensité V_{st} = 458 V et I_{st} = 13,22 A. Il nous faut dès lors rechercher des inverters avec au minimum 4 entrées MPPT de caractéristiques supérieures chacune à 458 V/13,22A et de puissance d'entrée PV supérieure à 23,66 kWc.

Nous partons donc des calculs des spécifications électriques des strings de panneaux PV pour aboutir à la puissance de l'inverter.

L'onduleur hybride DEYE SUN-16k-SG05LP3-EU-SM2 de puissance 16 kW coche toutes les cases, sa fiche technique est présentée en annexe V. Les 4 strings de 10 panneaux photovoltaïques occuperont chacun une entrée MPPT, l'onduleur disposant de 2 régulateurs MPPT incorporés avec deux entrées PV chacune. L'entrée 380 V de cet onduleur nous offre la possibilité d'y raccorder l'un des groupes électrogènes de la ferme pour gérer des situations d'urgence en cas de black-out énergétique en tirant jusqu'à 17,6 kVA de puissance.

Les régulateurs MPPT étant incorporés à l'onduleur, point n'est utile d'en faire un dimensionnement isolé.

2. Dimensionnement et choix du système thermique

Le système thermique à déployer dispose de trois grandes composantes : le séchoir de produits agricoles, le chauffe-eau solaire et les cuiseurs solaires.

a) Dimensionnement du séchoir solaire

(1) Hypothèses de travail

Le séchage solaire est une solution durable pour la conservation des produits agricoles dans les régions tropicales comme Djidja où l'ensoleillement abondant est profitable. Ce dimensionnement intègre des données climatiques, agronomiques et énergétiques qui sont :

- Ensoleillement moyen : 5,2 kWh/m²/j, soit 18,72 MJ/m²/j
- Température moyenne : 25–35 °C.
- Humidité relative : 60–80% en saison humide.

(2) Production globale à sécher

Le tableau 7 ci-après résume la production moyenne séchée sur les cinq dernières campagnes agricoles 2019 à 2024. En général, les produits à l'exportation ou faisant l'objet d'une commande spéciale bénéficiaient d'une insolation indirecte au séchoir électrique. Ce sont ces mêmes produits qui seront traités au séchoir solaire.

Tableau 7 : Type de séchage suivant spéculation

Ordre	Spéculation	Superficie emblavée (ha)	Masse (Tonne)	Masse à sécher par insolation indirecte	Observations
1	Bananes	2,1	12,5	2,6	Produit à l'export
2	Maïs	6,5	65,8	10	Commande du Programme Alimentaire Mondial
3	Mangue	2	10,5	4,15	Produit à l'export
4	Niébé	2,2	2,31	_	Insolation directe au soleil
5	Riz	3	13,5	13,5	Produit à l'export
6	Soja	4,1	8,10	_	Insolation directe au soleil
7	Tubercules	5,6	159,55	_	Insolation directe au soleil

On retient que les produits présentant un fort potentiel à l'export ou avec des normes d'hygiène et qualité plus strictes sont choisis par les promoteurs de la ferme pour passer au séchoir solaire comme les mangues, les bananes ainsi que la commande annuelle de riz du Programme Alimentaire Mondial. Tous les autres produits ont une très forte demande locale avec des exigences qualité moyennes. Les faire passer à l'insolation solaire ne dégagerait aucune plus-value économique.

(3) Niveau d'humidité à éliminer

Les niveaux d'humidité à extraire pour un séchage convenable dépendent des produits, le tableau ci-après les résume :

Tableau 8 : Proportion d'eau à extraire pour le séchage des produits agricoles

Proportion d'eau à extraire pour le séchage des produits agricoles
1. Mangue
Humidité initiale : 80-85 % (base humide)
Humidité finale : 15-20 % (consommation) ou 10-12 % (stockage prolongé)
Méthode : Insolation directe ou indirecte (indirecte préférable pour qualité)
Références :
- FAO (2012). Drying of Agricultural Products.
- Kitinoja, L., & Kader, A. A. (2003). Small-scale postharvest handling practices.
2. Maïs
Humidité initiale : 25-35 % (à la récolte)
Humidité finale : 13-14 % (stockage)
Méthode : Insolation directe (courante), indirecte pour éviter les aflatoxines
Références :
- FAO (1992). Maize in human nutrition.
- Agnew, J.M., & Leonard, M. (2003). Corn Drying and Storage.
3. Tubercules (manioc, patate douce, igname)
Humidité initiale : 60-80 %
Humidité finale : 10-12 % (transformation en farine)
Méthode : Insolation directe ou indirecte (préférable pour hygiène)
Références :
- Westby, A. (2002). Cassava utilization and processing.
- FAO (1995). Postharvest handling of root crops.
4. Banane (plantain ou dessert)
Humidité initiale : 75-80 %

Humidité finale : 15-20 % (consommation) ou 10-12 % (stockage)
Méthode : Insolation indirecte (préserve couleur, évite brunissement)
Références :
Emaga et al. (2007). Effects of maturation on banana peels. Food Chemistry.
- FAO (2012). Appropriate technology for banana drying.
5. Riz
Humidité initiale : 20-25 % (récolte)
Humidité finale : 12-14 % (stockage)
Méthode : Insolation indirecte (évite fissures des grains)
Références :
- IRRI (2013). Rice Postharvest Losses
- FAO (2014). Rice drying systems in Asia

Source : Synthèse Publications FAO.

(4) Énergie nécessaire au séchage solaire

L'énergie nécessaire à l'évaporation d'un kg d'eau est de q = 2,26 MJ/kg. Le calcul du volume global d'eau à faire évaporer permet d'évaluer l'énergie nécessaire. En se référant au tableau 8 ci-dessus, nous pouvons synthétiser le tableau ci-après.

Tableau 9 : Masse d'eau globale à faire évaporer

N°	Spéculation	Quantité globale à sécher	Durée de récolte	Taux d'humidité moyen initial %	Taux d'humidité moyen final %	Écart %	Quantité d'eau totale à faire évaporer (kg)
1	Mangue	4150	Fév. - Avril	82,50	17,50	65	2698
2	Maïs	10000	Juillet-Aout	30	13,50	16,50	1650
3	Banane	2600	Janv. – Déc.	77,50	17,50	60	1560
4	Riz	13500	Sept - Oct.	22,50	13,00	10	1282,50
	TOTAL	30250					7190

Source : Autoproduction

La quantité d'énergie quotidienne nécessaire à l'évaporation de ce volume d'eau est donc :

$$Q = \frac{1}{365}(Masse\ annuelle\ d'eau\ extraite\ (kG) * q\ (MJ/kG\ )$$

$$= \frac{1}{365}(7190\ x\ 2{,}26\ )$$

Q = 44,52 MJ

(5) Surface de captation solaire

Pour un rendement moyen de capteur solaire r = 30 %, « *Journal de la Société Ouest Africaine de Chimie, déc. 2018* », la surface de vitrage S nécessaire en m^2 est de :

$$S = Q/(Masse\ d'eau\ quotidienne\ \text{à}\ évaporer\ x\ rendement\ moyen)$$

$$S = \frac{44{,}52}{19{,}70\ x\ 0{,}3} = 7{,}53$$

Nous retiendrons donc S = 8 m^2 de surface de vitrage pour le séchoir solaire.
Pour des contraintes logistiques et techniques, il serait envisagé deux séchoirs solaires de 4 m^2 de surface vitrée chacun.

(6) Volume de la chambre de séchage

Selon « *El-Sebaii A. A. et coll., 2012* », la charge spécifique pour un séchoir solaire est de 5-10 kg/m² avec un débit d'air maximum de 1,0 m³/h·kg.
Pour la masse moyenne annuelle de 30 250 kg de produits à sécher, données suivant tableau 9, l'équivalent de 82,88 kg par jour, la surface d'échange suivant la charge spécifique moyenne de 7,5 kg/m² est de 12,44 m^2 de grille. Nous adoptons une surface de 13 m^2 pour la suite de l'étude.
Le volume nécessaire pour 1 mètre de hauteur de séchoir solaire sera donc de 13 m³, soit deux fois 6,5 m³.

(7) Système de ventilation

Pour le débit d'air de 1,0 m³/h.kg adopté, les 83 kg de matière à sécher quotidiennement correspondent à des débits de 83 m³/h. Nous optons pour un ventilateur de 12V, 100 m³/h alimenté par un panneau solaire de 100 Wc.
Bien qu'il paraisse surdimensionné, ce modèle est le plus courant et a l'avantage d'être disponible sur le marché local.

Nous retenons donc comme spécifications techniques de notre séchoir solaire, les données du tableau suivant :

Tableau 10 : Composants du séchoir solaire

Ordre	Composants	Caractéristiques
1	Capteur solaire	8 m² (vitrage polycarbonate, absorbeur noir)
2	Chambre de séchage	13 m² de grilles, volume 13 m³ (isolation bois)
3	Ventilation	Ventilateur 100 m³/h + Panneau PV 12V, 100 Wc
4	Matériaux	Bois local, briques, toile noire, métal galvanisé

Les optimisations suivantes sont prévues pour être implémentées :

- intégration d'un stockage thermique par ajout de pierres et roches chauffées pour tamponner la chaleur la nuit,
- mise en place d'un système hybride par couplage avec biomasse, résidus agricoles, pour jours nuageux.

En conclusion, un séchoir solaire de 8 m² de vitrage, de 13 m^3 de chambre de séchage permet de traiter 83 kg de produits agricoles par jour tout au long de l'année.

b) Dimensionnement du capteur plan solaire

(1) Hypothèses de travail

- Nombre d'utilisateurs : 6 bungalows × 2 personnes = 12 personnes ;
- Taux d'occupation moyen des bungalows = 33% ;
- Besoin en eau chaude sanitaire : 50 L/personne/jour ;
- Température moyenne d'eau de robinet : 25 °C ;
- Température souhaitée ECS : 50 °C ;
- Chaleur spécifique de l'eau : c = 4,186 kJ/kg. °C ;
- Ensoleillement moyen : 5,2 kWh/m²/jour.

(2) Énergie quotidienne nécessaire pour le chauffage d'eau

- Volume V d'eau total quotidien : (12 x 50) x 0,33 = 198 litres, soit une masse m équivalente.
- Énergie thermique Q requise pour chauffer l'eau de 25 °C à 50 °C, ΔT = 25 °C

$$Q = mc\,\Delta T$$

$$Q = 198\ x\ 4{,}186\ x\ 25 = 20\,721\ kJ = 5{,}76\ \text{kWh}$$

(3) Dimensionnement des capteurs solaires plans vitrés

- Rendement moyen capteur plan sous climat tropical : 50-60 %, *selon Duffie & coll., 2020*, nous prendrons une moyenne de 0,55.
- Énergie solaire disponible par unité de surface : 5,2 kWh/m²/j
  - Énergie utile par m² de capteur : 0,55 x 5,2 kWh/m²/j = 2,86 kWh/m²/j
- Surface brute des capteurs : $S = \frac{Energie\ quotidienne\ nécessaire}{Energie\ utile\ par\ unité\ de\ surface}$

S = (5,76 kWh)/ (2,86 kWh/m²/j) = 2,01 m²

Nous optons pour 1 capteur plan double vitrage de 2,1 m² de surface avec une inclinaison à l'installation de 10 - 15° plein sud.

(4) Dimensionnement du ballon de stockage

- Besoin journalier en eau : V = 198 Litres
- Le besoin journalier de 198 litres, induit un volume de ballon minimum de 1,5 V et un volume optimal de 2 V (IEA SHC task 44 52021 - Solar thermal Systems for Hotels and resorts). Le ballon de stockage aura donc un volume de 300 litres.
- Isolation : La limitation des déperditions thermiques nocturnes au niveau du ballon impose une isolation par laine de verre ou en polyuréthane.

(5) Dimensionnement des composants hydrauliques

Le capteur héliothermique ne dispose pas de pompe de circulation mais possède un groupe de sécurité composé de soupape de sécurité (Pression 6 bars, T_{max} = 120 °C), de purgeur automatique (Diamètre nominal DN10, résistance à 120 °C, et de manomètre à échelle visible (0-10 bars). Cet ensemble est complété par un régulateur différentiel anti-surchauffe dont la consigne sera 80 ° C. Le groupe de sécurité n'est pas à dimensionner, il est fourni en kit avec le système de chauffe-eau à thermosiphon dont la fiche technique est en annexe VI.

3. Dimensionnement et choix des cuiseurs solaires

Suivant les données du tableau de l'annexe I, les activités de torréfaction de gari et de tapioca, de pasteurisation de jus de fruits et cuissons diverses sont consommatrices de fagots de bois et de charbon de bois utilisés dans des proportions équivalentes à 527,34 kWh/j soit 491, 84 kWh/j pour le bois et 35,50 kWh/j pour le charbon de bois. C'est l'équivalent journalier de la consommation annuelle de 132 stères de bois et 1 440 kg de charbon de bois. En prenant en compte le rendement thermique des foyers traditionnels à bois (3 pierres) et charbon de bois améliorés, qui sont respectivement de 14 % et de 30-50 % suivant « *Cirad, Louppe Dominique, 2014* », nous évaluons l'énergie nette Q apportée pour les cuissons :

$$Q = (491{,}84\ x\ 0{,}14) + (35{,}50\ x\ 0{,}4) = 83{,}06\ kWh/j$$

avec le rendement moyen du foyer à charbon pris à 40 %.

L'énergie thermique nette à apporter par les cuiseurs solaires est nécessaire pour le séchage, le chauffage, les cuissons diverses, la torréfaction et la pasteurisation des boissons et jus de l'unité de transformation. Les deux types de cuiseurs solaires, cuiseur à concentration (parabole) et four solaire sont à déployer au vu des activités de transformation.

a) Données de bases

- Besoins énergétiques journaliers : 83,06 kWh/jour, soit 299 MJ/jour
- Irradiation solaire moyen : 5,2 kWh/m²/j soit 18,72 MJ/m²/j
- Rendement thermique moyen d'un four solaire : 30–40 % incluant les pertes par convection, conduction et réflexion, *« Duffie, J. A., et coll., 2013 »*
- Rendement thermique moyen d'un cuiseur solaire à concentration : 40-60% incluant les pertes par convection, conduction et réflexion, « *Schwarzer, K, 2008 ».*
- Durée moyenne d'ensoleillement : 6,2 h/jour
- Nombre de four solaire : 2 unités pour diverses opérations.
- Nombre de cuiseur à concentration : 4 unités servant à la torréfaction de gari et tapioca, à la production de l'huile de palme.

b) Besoins énergétiques journaliers

Les 299 MJ comme besoins journaliers répartis sur les 06 foyers préexistants induisent une quantité d'énergie thermique nette de 49,84 MJ par foyer par jour.

En tenant compte des rendements moyens de 0,35 pour le four solaire et 0,5 pour le cuiseur à concentration nous obtenons des besoins de 142,38 MJ/j par four solaire et 99,67 MJ/j par concentrateur solaire.

c) Surface A de captation nécessaire

- Pour le four solaire : $A1 = \frac{Besoin\ d'énergie\ par\ concentrateur\ solaire}{Irradiation\ solaire\ moyen}$ = 142,38/18,72

On obtient A_1 = 7,61 m^2. Les deux fours solaires envisagés induisent donc une surface de captation d'environ 16 m^2.

- Pour le cuiseur solaire : $A2 = \frac{Besoin\ d'énergie\ par\ four}{Irradiation\ solaire\ moyen} = 99{,}67/18{,}72$

On obtient A_2 = 5,32 m^2. Les deux cuiseurs solaires à concentration envisagés nécessitent donc une surface réfléchissante d'environ 22 m^2.

Pour des contraintes logistiques, nous optons pour 8 fours solaires de 2 m^2 de surface de captation chacun et 8 cuiseurs à concentration de 3 m^2 de surface de captation chacun.

d) Caractéristiques techniques des cuiseurs solaires

- Température moyenne des fours solaires : 150–180 °C ;
- Surface du double vitrage : 2 m^2 ;
- Isolation : Laine de verre (conductivité thermique 0,04 W/M°K) ;
- Réflecteurs additionnels prévus pour accroître l'efficacité ;

- Température moyenne des cuiseurs solaires à concentration : 200–350 °C ;
- Surface réfléchissante en miroir d'aluminium ou film polymère : 3 m^2 ;
- Suivi solaire : Mode manuel, par ajustement toutes les demi-heures.

Les deux types de cuiseurs solaires disposent de système de stockage d'énergie thermique constitué de roche et bac de sable chauffé à 200-250 °C.

4. Dimensionnement et choix des éoliennes

Le tableau de l'annexe VII résume les charges couvertes par le système éolien, au total 21,2 kWh/j. Nous y appliquons comme au solaire un coefficient de sécurité et d'extension de

1,1 et obtenons un besoin à couvrir par l'éolienne par jour de 23,32 kWh. L'objectif est donc de fournir cette quantité d'énergie chaque jour sans batterie dédiée et d'injecter le surplus (éolien + solaire) non consommé dans le pack de batteries du système hybride et par-delà sur le réseau local qui desservirait les fermes environnantes.

a) Paramètres de Dimensionnement

- Besoins énergétiques : 23,32 kWh/j
- Vitesse moyenne du vent du site : 3-4 m/s, suivant données du graphique 3 Weatherspark 2024 cité plus haut. Nous retiendrons une moyenne v_1 = 3,5 m/s à 10 m au-dessus du sol.

Nous notons qu'il s'agit d'un site faiblement venteux et privilégions une éolienne appropriée, de type VAWT adapté à cet environnement. Nous compenserons partiellement la faiblesse des ressources ventologiques par une plus grande hauteur de mât de 35 mètres. L'annexe VIII montre le tableau comparatif des éoliennes de types VAWT et HAWT.

Par usage du profil logarithmique de la vitesse des vents, nous obtenons la vitesse v_2 à 35 mètres de hauteur par la formule :

$$v_2 = v_1 \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)}$$

où la vitesse de référence v_1 est mesurée à la hauteur de référence h_1 = 10 m ; v_2 est la vitesse du vent à la hauteur h_2 = 35 m ; Z_0 est la longueur de rugosité. Z_0 vaut 0,1 pour les terrains agricoles avec quelques bâtiments et des haies de 8 m de hauteur distantes d'environ 500 m ; www.data.ch ; configuration typique de la ferme FIS.

Nous obtenons par cette formule une vitesse v_2 = 4,45 m/s.

- Heures équivalentes pleine puissance (HEPP) à 35 m de hauteur : Nous la déduirons de la courbe de puissance de l'éolienne établie par le constructeur.
- Rendement système : 30-50 % tenant compte des pertes aérodynamiques, de la conversion, du transport suivant données de l'encyclopédie de l'énergie : Articles techniques détaillés sur la production électrique éolienne. Nous retiendrons la borne inférieure par principe de précaution, soit 30 % comme rendement moyen global, en se basant sur l'augmentation des rendements suivant la puissance croissante des éoliennes.
- Tension du système PV existant : 48V

b) Mode d'injection de surplus d'énergie des systèmes hybrides

Chaque source, PV et éolienne, dispose de son propre régulateur qui gère indépendamment la charge des batteries. Le régulateur solaire est intégré à l'onduleur hybride. En mode normal ou charge directe, l'énergie produite par l'éolienne passe par un régulateur de charge spécifique aux éoliennes. Ce contrôleur est conçu pour adapter la tension et le courant fournis par l'éolienne aux caractéristiques des batteries, afin d'assurer une charge correcte et protéger les batteries contre les surtensions et les surintensités.

Le régulateur éolien DC redresse et stabilise le courant triphasé variable produit par l'éolienne et l'onduleur hybride gère entre autres la synchronisation et la priorisation des charges. Le surplus de production éolienne, par exemple la nuit quand la production PV est nulle et que le vent souffle, est directement injecté dans les batteries suivant leur capacité d'absorption instantanée.

Quand les batteries atteignent leur niveau de charge maximale, 100 % SOC selon les paramètres du BMS, le régulateur éolien réagit pour protéger les batteries et gérer l'excédent d'énergie en le déviant vers une résistance de diversion. C'est la fonction dump load qui devrait dissiper l'énergie sous forme de chaleur au travers des résistances, cette résistance est remplacée ici par des circuits de prises électriques et de recharge de batterie du mini réseau de desserte des fermes environnantes. Ceci permet de freiner l'éolienne indirectement en augmentant la charge électrique qui ralentit sa rotation et évite qu'elle tourne en roue libre à des vitesses dangereuses. C'est un freinage électrique passif pour éviter de détériorer les batteries ou l'éolienne.

c) Calcul de la puissance et choix de l'éolienne

$$P \text{ éolienne } = Besoin\ quotidien\ (kWh)/(HEPP\ x\ Rendement\ global)$$

Pour une plage de facteur de charge moyen admis dans la filière éolienne on-shore de 15-25 % pour les petites éoliennes suivant National Wind Watch, www.wind-watch.org, nous obtenons un HEPP équivalent minimum de :

HEPP = 0,15 x 24 heures = 3,6 heures.

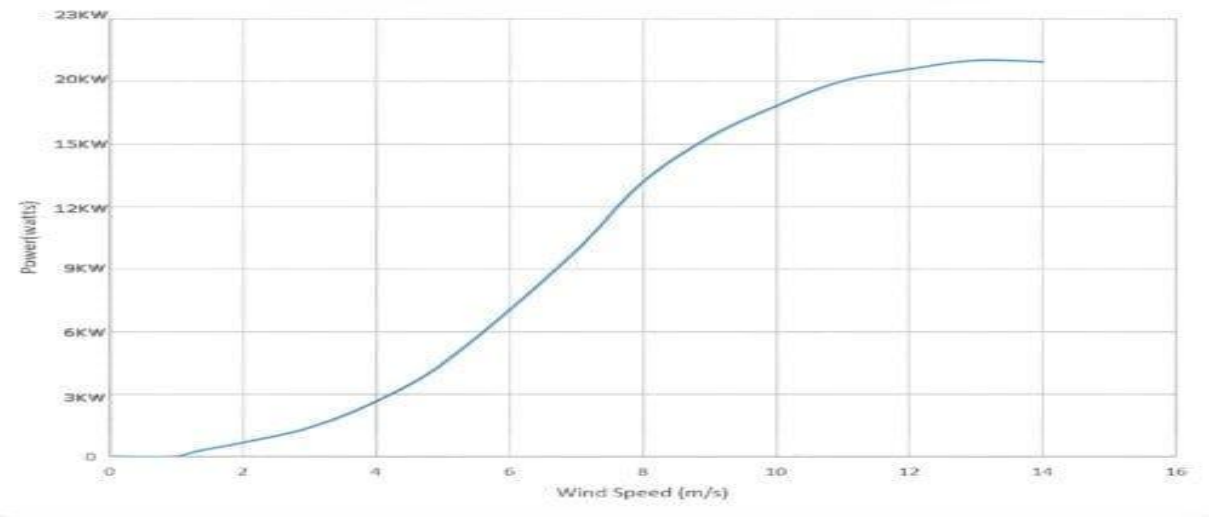
Ce HEPP, à priori aléatoire, permet de délimiter les contours de la puissance d'éolienne à choisir. On trouve :

$$P \text{ éolienne } = \frac{23{,}32\ kWh}{3{,}6\ \ x\ 0{,}3} = 21{,}59\ kW$$

avec 0,3 le rendement moyen global des petites éoliennes de puissance inférieures à 50 kW, « *Burton et al, 2011* ».

Nous pouvons donc prospecter les éoliennes de puissances normalisées 20 et 25 kW.

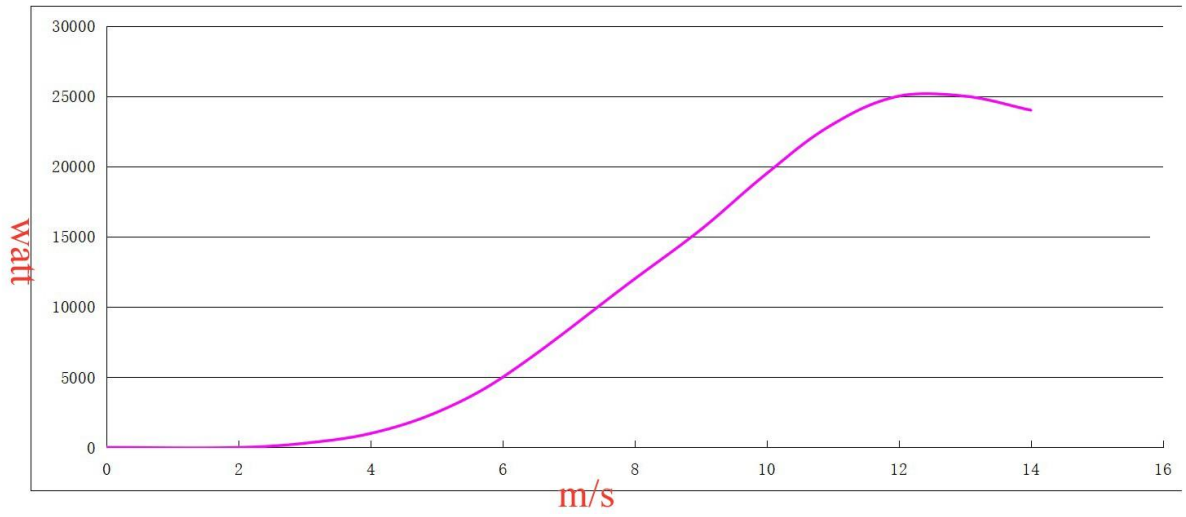
(1) Étude de la courbe de puissance de l'éolienne de 20 kW



Graphique 6 : Courbe de puissance de l'éolienne 20 kW ; Source : Fournisseur éolienne R&X Energy

A l'analyse, on a une vitesse de démarrage de 1,5 m/s, une vitesse nominale de 11 m/s. Pour 4,45 m/s, vitesse à la hauteur de 35 mètres, la puissance moyenne à générer par l'éolienne est de 3,2 kW. Cela correspond à un facteur de charge de 3,2 kW/20 kW, soit 16 %.

(2) Étude de la courbe de puissance de l'éolienne de 25 kW



Graphique 7 : Courbe de puissance de l'éolienne 25 kW ; Source : Fournisseur éolienne R&X Energy

A l'analyse, cette éolienne a une vitesse de démarrage de 2,5 m/s et une vitesse nominale de 12 m/s. A 4,45 m/s, vitesse à la hauteur de 35 mètres, la puissance moyenne à générer par l'éolienne est de 1,25 kW. Cela correspond à un facteur de charge de 1,25 kW/25kW, soit 5 %. L'éolienne de puissance 20 kW, de facteur de charge 16 % présente de meilleurs avantages sur les plans rendement, vitesse de démarrage et logistique. Il est retenu pour la suite de l'étude. Les spécifications techniques du constructeur sont indiquées en annexe IX.

d) Vérification de la puissance de l'éolienne

- Puissance éolienne : 20 kW
- Facteur de charge = 0,16
- Rendement global : 0,3

Énergie produite : Q = 20 kW x 0,16 x 24 x 0,3 = 23,04 kWh.

L'éolienne produit donc 23,04 kWh/j pour des besoins majorés de 10 % équivalents à 23,32 kWh/j : le choix de l'éolienne de 20 kW est bien cohérent.

e) Architecture du couplage avec le système PV

La figure 4 illustre un mode de couplage avec une alimentation directe des équipements AC par l'onduleur hybride via les raccordements éolien et solaire. Les batteries n'alimentent les équipements qu'en l'absence de recharge des deux sources ou de sollicitation d'énergie au-dessus de la capacité combinée des sources photovoltaïque et éolienne.

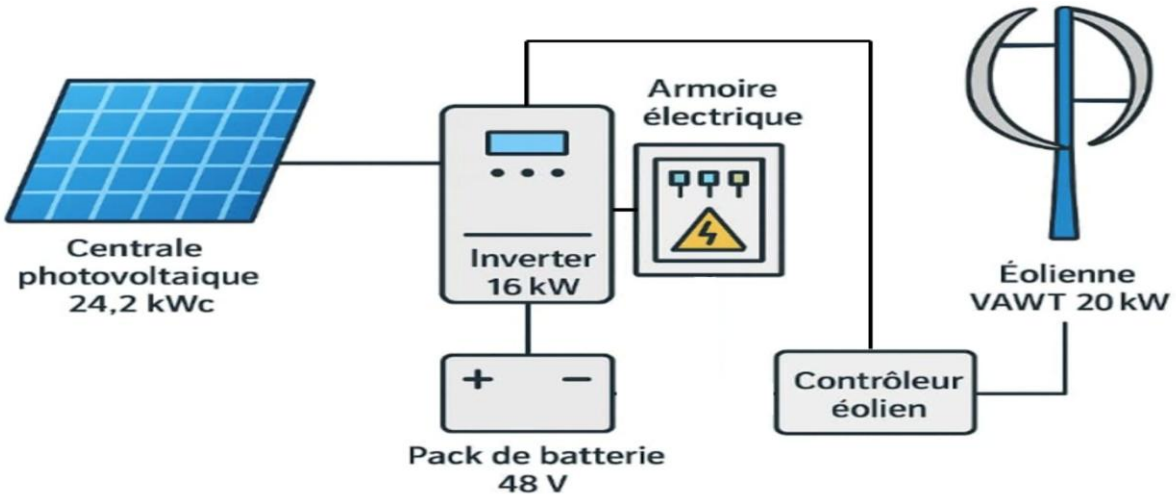


Figure 4 : Architecture du réseau PV + Éolien

Source : Autoproduction

Notons que l'onduleur hybride dimensionné pour le volet photovoltaïque est aussi utilisé pour l'éolienne.

f) Optimisation envisagée

Une Étude ventologique précise avec un anémomètre sur site pendant 12 mois pour valider la vitesse du vent ainsi que sa distribution par mesure locale permettra d'affiner les calculs.

5. Dimensionnement du système de méthanisation

a) Hypothèses de travail

PCI méthane : 9,94 kWh/kg

PCI butane :12,66 kWh/kg

PCI moyen biogaz à 60% de méthane : 5,96 kWh/kg

Masse volumique du biogaz : 0,93 à 1,27 kg/m3 ; celle du biogaz de décharges issu des ordures ménagères et déchets végétaux est de 1,21 kg/m3 (www.biogaz-energie-renouvelable.info)

Le tableau des consommations journalières de l'annexe 1 indique un besoin mensuel de 39 kg de gaz butane pour la cuisine du restaurant. Avec une réserve de 1,1 comme marge de sécurité et d'extension et en considérant le PCI du butane, le PCI moyen du biogaz, et la masse volumique du biogaz, le volume moyen de biogaz à produire par mois en équivalent de PCI butane est de :

$$V = 1{,}1\ x\ \left(\frac{1}{1{,}21}\right) \text{x}[39\ kG\ x\ \frac{12{,}66\ kWh/kG}{5{,}96\ kWh/KG}]\ ,$$

$$V = 75{,}32\ m^3$$

b) Dimensionnement du bio digesteur

(1) Calcul du Volume utile du bio digesteur (V_d)

- Production totale journalière : 2,51 m³.

- Rendement : selon *Angelidaki et coll., 2005,* le rendement typique est de 0,2–0,4 m³/kg de fraction organique biodégradable d'intrants VS selon le substrat qui, dans notre cas, est un mélange de déjections bovines, de résidus agricoles et de restes de repas. La précision viendra de *Marchaim, 1992* qui stipule que pour un mélange de fumier bovins et de déchets agricoles le rendement moyen du substrat est d'environ 0,25 m³/kg VS.

- Matière sèche nécessaire :

$$MS\ =\ (2{,}51\ m^3)/(0{,}25\ m^3/kg\ =\ 10{,}04\ kg/jour$$

Pour un taux moyen de substrat à 20 % de matière sèche, nous avons un besoin de 50,21 kg/jour de matière brute.

- Temps de Rétention Hydraulique (TRH) :

Suivant *Metcalf et coll., 2014,* le TRH recommandé en mésophile pour une température ambiante de 25-40°C est de 20–30 jours. On retiendra une moyenne de 25 jours pour les calculs.

- Volume utile (V_d) = Production × TRH = 2,51 m³/j × 25 j = 62,75 m³.

- Optimisation :

En se référant à *Weiland, 2010*, une efficacité de plus de 50 % est attendue avec l'adoption du système à lit fixe. Ceci réduira en pratique le volume V_d à environ $V_d \approx 31{,}38$ m³. Les dimensions projetées du digesteur suivant ce volume sont : Diamètre : 4 mètres ; hauteur hors dôme : 2,6 mètres. On obtient un volume de digesteur sous voûte de 32 m³.

(2) Type de bio digesteur

Les possibilités existantes sont :

- Digesteur à dôme fixe en béton armé avec enduit lisse étanche pour la durabilité, *« GTZ, 2007.* »

- Digesteur double membrane étanche souple PEHD 1,5 mm ISO 9080 pour résistant aux UV.

La première solution est retenue pour la maîtrise technique disponible localement.

(3) Système de Tuyauterie

- Norme EN 12201 (PVC/PEHD) pour pression ≤ 25 mbar.
- Diamètre : Il sera dimensionné suivant les données de pic de débit avec la contrainte que le temps d'utilisation journalier est compris entre 6 et 10 heures.

Selon *Cheng et coll., 2014,* la norme EN 12201 (PVC/PEHD) pour pression ≤ 25 mbar régit ce type d'écoulement de fluide. Le calcul basé sur un débit de 0,12 L/s (2,51 m³ pour 6h de fonctionnement) autorise un diamètre nominal DN 25 mm pour la ligne principale digesteur-gazomètre et DN 20 mm pour la ligne gazomètre-cuisine. Toutes ces tuyauteries autorisent couramment des pressions jusqu'à 10 bars sur les réseaux d'eau, ils présentent des niveaux de résistance mécanique élevée.

(4) Accessoires et dispositifs de sécurité

Le système requiert :

- 1 séparateur d'eau tous les 20-30 m selon *BSP (2015) – Biogas Handbook*. Nous en monterons 02, dont 1 entre le digesteur et le gazomètre, 1 entre le gazomètre et la cuisine.
- 2 compteurs à gaz pour mesure des volumes, type diaphragme OIML R137, en sorties du digesteur et du gazomètre.
- 4 clapets anti-retour, 1 par foyer pour éviter les retours de flamme.
- 2 régulateurs pour maintien de pression à 10-25 mbar en amont et en aval du gazomètre.

c) Stockage du biogaz

Il est réalisé au niveau du gazomètre dont le volume moyen est dimensionné suivant la norme VDI 4630 régissant la fermentation des matières organiques.

- Volume du gazomètre : 30–50 % de la production journalière, soit 0,76–1,26 m³ (réf. VDI 4630). Nous adoptons un volume moyen de gazomètre de 1 m^3.
- La poche souple en PEHD renforcé (norme ISO 13953) qui est plus économique, sera préféré au dôme flottant bien que ce dernier soit plus durable et étanche.

d) Collecte et prétraitement des intrants

Ce sous-système sera composé de :

- Bac de mélange de volume 2-3 m³ en béton pour alimenter le bio digesteur.
- Tamis grossier 5-10 mm pour éliminer les impuretés.

- Pompe à lisier : Débit 2-3 m³/h pour l'alimentation quotidienne.

e) Traitement des digestats

- Masse du digestat : ≈ 90% des intrants, suivant *Møller et al., 2009,* soit :

$$0,9 \times 50,21 \text{ kg} = 45,19 \text{ kg/jour}$$

C'est l'équivalent de 16,49 tonnes d'intrants de production annuelle.

- Bassin de stockage :
  - Dimensionnement pour une durée de 2–3 mois équivaut à 2,75 à 4,12 Tonnes de digestat (étanchéité NF P 84-500).
  - Valorisation : Épandage agricole ou compostage avec possibilité de revente.

f) Sécurité du dispositif et maintenance

La sécurité impose une détection de méthane avec alarme sonore à un seuil de saturation d'air ambiant supérieur ou égal à 1 % couplée à une ventilation par déclenchement automatique. Les deux exigences sont régies par la directive et le code suivants encadrant les règles de sécurité dans les milieux explosifs et les installations de gaz combustible.

- Détecteurs de CH_4 : ATEX Directive 2014/34/UE ; seuil d'alarme à 1 % CH_4.
- Ventilation : Code NFPA 54 imposant un renouvellement d'air ≥ 12 volumes/heure ; une ventilation forcée dans la zone de stockage s'impose.
- Extincteurs CO_2 pour contrer les risques d'incendie.

Quant à la maintenance du dispositif, le planning d'entretien ci-après est de mise :

- Entretien quotidien : vérification des fuites, vidange des condensats (réf. ISO 16110)
- Entretien Hebdomadaire : nettoyage des filtres, contrôle du pH.
- Entretien trimestriel : inspection de l'étanchéité du gazomètre
- Entretien annuel : inspection de l'étanchéité du digesteur (Norme EN 1762).

En termes d'optimisation, une étude des substrats locaux tels que le fumier récolté sur place et les déchets organiques issus de l'exploitation de la ferme permettrait d'affiner le présent dimensionnement.

6. Composition du mix énergétique de la ferme

Le mix énergétique de la ferme FIS de Djidja se compose de solaire photovoltaïque, d'éolienne, de solaire thermique, et de bio digesteur. On retient les composantes suivantes :

* 1 système d'alimentation solaire photovoltaïque :
- 40 panneaux PV de 605 Wc, soit 4 strings de 10 panneaux
- 24 batteries 12V, 250 Ah LiFePO4, soit un pack de 1 500 Ah, 48V
- 1 onduleur hybride 16 kW, Ue = 48 V avec contrôleur solaire incorporé

* 1 système de séchage :
- 2 capteurs plans de 4 m^2 chacun
- 2 chambres de séchage de 6,5 m^3 chacune pour traiter au total 83 kg de produits par jour

* 1 système de production d'eau chaude sanitaire :
- 1 capteur plan double vitrage de 2,01 m^2
- 1 ballon de stockage de 300 litres
- 1 kit complet de sécurité

* 1 dispositif de cuisson :
- 8 fours solaires de 2 m^2 de surface de captation chacun
- 8 cuiseurs solaires à concentration de 3 m^2 de surface réfléchissante chacun

*1 système éolien VAWT avec couplage hybride solaire :
- 1 éolienne VAWT de 20 kW de puissance
- 1 contrôleur éolien avec la fonction dump load
- 1 dispositif de régulation avec freinage
- 1 dispositif de freinage d'urgence
- 1 mât de 35 mètres
- 1 coffret électrique de protection des départs
- 1 kit de câbles et accessoires de raccordement

*1 système de méthanisation composé tel qu'il suit :
1 digesteur à dôme fixe en béton de volume hors dôme de 32 m^3
1 gazomètre pour le stockage de 1 m^3 de biogaz par jour
1 bac de mélange de volume 2-3 m^3 en béton
1 tamis grossier (5-10 mm) pour éliminer les impuretés
1 Pompe à lisier de débit 2-3 m^3/h
1 dispositif de sécurité

B. FAISABILITE TECHNIQUE ET SCHEMAS

1. Faisabilité technique du projet

Le mix énergétique proposé est techniquement réalisable, il intègre des technologies éprouvées et complémentaires et prend en compte les éléments d'analyses SWOT et PESTEL développées plus haut. Par ailleurs, la demande importante en énergie des fermes voisines, réévaluées à 3 reprises à la hausse suivant les requêtes des clients potentiels augurent de cash flows certains. Cette demande, au 30 Mars 2025 équivalait à 295 kWh/j : c'est bien plus que la capacité totale de production d'énergie de la ferme FIS.

a) Système Photovoltaïque

- Capacité installée :
  - 40 panneaux × 605 Wc = 24,2 kWc
  - Stockage : 24 batteries × 12V × 250 Ah = 72 kWh (système 48V)
  - Onduleur : 16 kW avec régulateurs MPTT incorporé

Faisabilité : Dimensionnement cohérent pour une autonomie énergétique avec un bon rapport production/stockage, une main d'œuvre compétente et formée localement pour l'installation et l'exploitation. Technologie éprouvée.

b) Séchoir Solaire

- Surface totale de captation : 8 m²
- Chambre de séchage : 13 m³ avec une capacité de 83 kg/jour
- Technologie low cost, production locale envisagée

Faisabilité : Technologie simple et efficace pour le séchage agricole, adaptée au climat ensoleillé du Bénin. Maintenance simplifiée.

Les surfaces vitrées de 8 m² sont rares et imposent des défis logistiques de taille, le choix de deux sous-systèmes identiques à combiner résout ce problème.

c) Capteur plan solaire

- Capteur double vitrage : 2,01 m²
- Ballon de stockage : 300 L
- Technologie basique à thermosiphon sans pompe

Faisabilité : Solution efficace pour les besoins en eau chaude sanitaire, avec une bonne capacité de stockage. Suivi et maintenance basiques, formation du personnel exploitant projeté.

d) Cuiseurs solaires

- Fours solaires de surface totale de captation 16 m² (8 × 2 m²)
- Cuiseurs solaires à concentration de surface réfléchissante 24 m² (8 × 3 m²)
- Technologie low cost, production partiellement locale à envisager.
- Faisabilité : Montage par les équipes et exploitants de la ferme, essais d'exploitation et suivi sur une semaine.

Les réflecteurs de grande surface sont peu courants et destinés à des applications industrielles très spécifiques. Ces contraintes techniques imposent des combinaisons de plusieurs cuiseurs avec un total de surface de réflecteurs identiques. Les grands réflecteurs courants du marché sont de l'ordre de 3-4 m^2.

e) Éolienne VAWT

- Modèle : 20 kW VAWT, éolienne à axe vertical, adaptée aux vents variables
- Couplage hybride : Permet de recharger les batteries du système PV
- Vitesse de démarrage de 1,5 m/s adapté aux sites faiblement venteux

Faisabilité : Complément idéal au solaire, surtout en saison des pluies où l'ensoleillement est réduit. Formation du personnel et suivi par une équipe de technicien formée ad 'hoc avec un entretien trimestriel approprié.

f) Méthanisation

- Biogaz : 2,51 m³ pour la cuisson.
- Faisabilité : Solution durable pour valoriser les déchets agricoles et réduire la dépendance au gaz butane, énergie fossile. Technologie éprouvée.

Cette phase induit une insistance sur la formation au changement et un accompagnement à long terme pour la gestion des problèmes culturels comme les odeurs de déchets en décomposition, les liaisons incompatibles entre déchets et repas.

En considérant que sur chaque composante du projet, une formation technique à la maintenance et un suivi d'adaptation au changement sont planifiés, nous pouvons conclure de tous les éléments précédents que le projet est techniquement viable grâce à :

- une combinaison intelligente de sources renouvelables (solaire, éolien, biogaz),
- un choix de montage des équipements en travail collaboratif avec le personnel technique de la ferme,
- une formation continue en appui aux connaissances initiales,
- un haut niveau d'engagement de l'équipe dirigeante et une implication totale du personnel de la ferme,
- un dimensionnement adapté aux besoins énergétiques actuels et projetés de la ferme,
- des technologies majoritairement éprouvées et adaptées au contexte local : ensoleillement élevé, disponibilité de biomasse,
- un plan de maintenance détaillé et simplifié décliné en check-list,
- un suivi/coaching régulier des équipes d'entretien par les techniciens spécialisés et installateurs.

2. Schémas et plans de réalisation

a) Schéma Global du Mix Énergétique

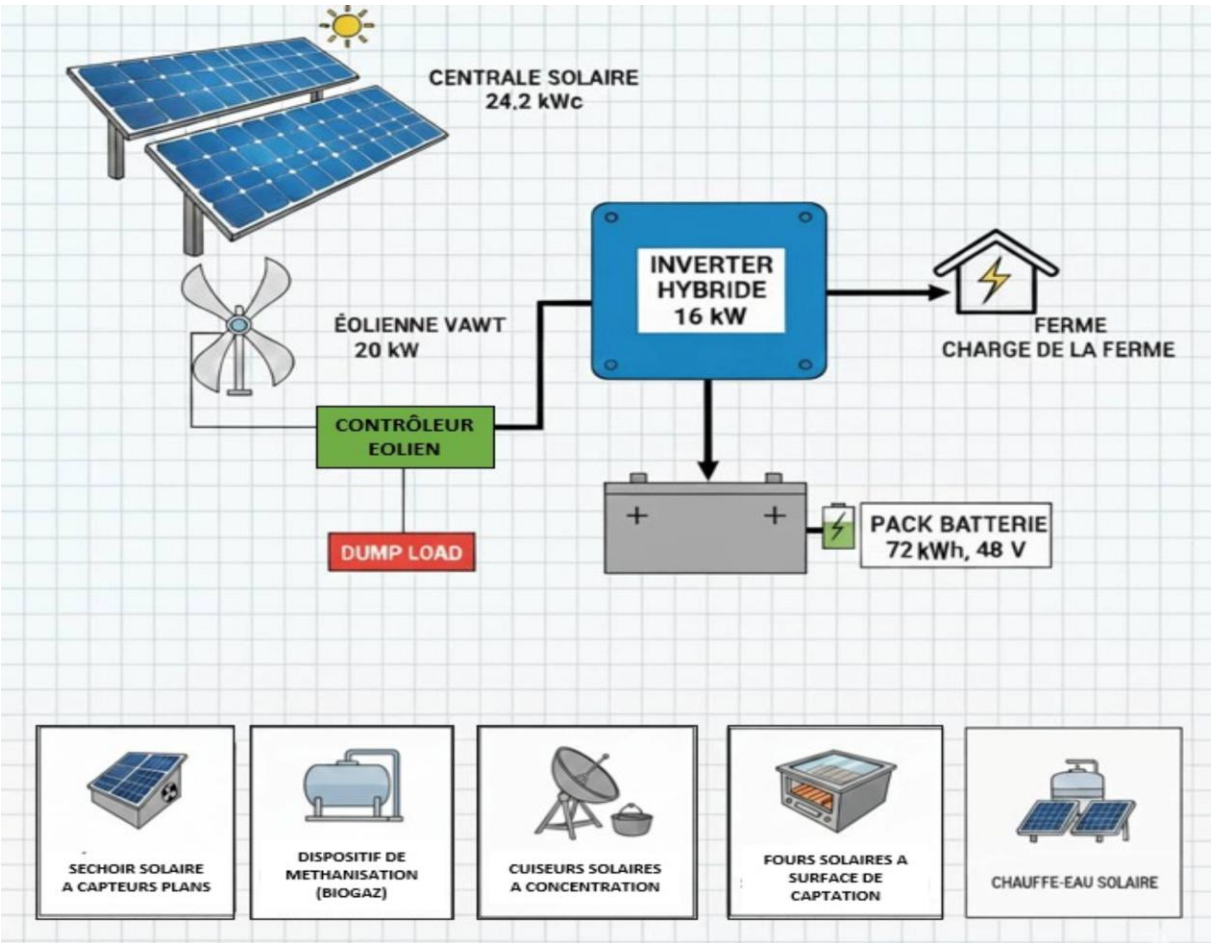


Figure 5 : Schéma intégrant panneaux PV, éolienne et systèmes thermiques

b) Zones d'implantation des sources énergétiques de la ferme

- Panneaux PV : au sol, inclinés à 10-15° sud pour l'optimisation de l'ensoleillement. La ferme solaire est à installer de façon équidistante des bâtiments à alimenter.
- Éolienne VAWT : zone dégagée, loin des obstacles à une hauteur de 35 m. Il sera implanté en bordure du fleuve Couffo qui borde le domaine.
- Séchoir & Chauffe-eau : proximité des hangars agricoles et dans les bungalows.
- Fours solaires et cuiseurs solaires à concentration : près des unités de transformation.
- Unité de méthanisation : près des étables et zones de stockage de déchets.

C. CONTENUS DE MAINTENANCE

Le tableau ci-après résume le plan de maintenance des divers systèmes.

Tableau 11 : Plan de maintenance des systèmes de la ferme FIS

Système	Maintenance préventive	Fréquence préventive	Maintenance curative	Fréquence curative
Hybride éolien + photovoltaïque	- Inspection visuelle pales et fixations - Nettoyage panneaux solaires - Vérification connexions électriques - Contrôle serrage, tensions et courants batteries - Contrôle du système BMS - Test sur onduleur - Test dump load	Mensuel / Trimestriel	- Remplacement pales - Réparation onduleur / contrôleur - Changement batteries	- Remplacement batteries tous les 8-10 ans. - Remplacement en urgence des câbles et disjoncteurs endommagés. - Autres : Selon panne détectée
Séchoir solaire	- Nettoyage surfaces vitrées et chambre - Vérification aérations et filets - Contrôle charnières / joints	Mensuel / Après saison	- Remplacement vitres/plastiques -Réparation portes, ventilateurs	Au besoin après dommage
Capteurs plans solaires thermiques	- Nettoyage vitre / absorbeur - Contrôle d'étanchéité - Vérification isolation tuyaux - Test circulateur	Mensuel / Annuel	- Purge et remplacement fluide - Remplacement vitres - Réparation fuites	Selon fuite ou casse

Cuiseurs solaires	- Nettoyage des réflecteurs et vitres - Contrôle des fixations, vis et charnières - Vérification d'état des matériaux isolants - Lubrification des axes de rotation - Contrôle supports d'orientation - Vérification caisson isolé	Quotidien/ Hebdomadaire Trimestriel Mensuel / Trimestriel Mensuel / Trimestriel	- Polissage des réflecteurs - Réparation des réflecteurs endommagés - Changement d'isolant - Remplacement de joint de vitre - Recalibrage des capteurs de lumière - Réparation serrures / charnières	- Si faible réflexion - Si vitre fissurée, miroir cassé ou déformé ou réflecteur oxydé) - Si détérioration - Si étanchéité compromise - Si nécessaire Dès dysfonctionnement
Système de méthanisation	- Contrôle T° et pH digesteur - Graissage agitateurs - Vérification fuites de gaz - Nettoyage filtres biogaz	Hebdomadaire / Mensuel	- Réparation fissures ou fuites - Remplacement membranes / pompes - Reprise soudures	Dès la détection de fuite ou dysfonctionnement

Ce plan sera décliné en actions détaillées et affiché au niveau des équipements et des diverses unités de production une fois les installations achevées. Cette déclinaison sera issue d'un brainstorming avec tous les exploitants et techniciens de la ferme permettant une meilleure maîtrise des enjeux de maintenance, une plus grande compréhension des fonctionnements et une appropriation des investissements en cours.

Le projet est techniquement faisable. Les schémas proposés permettent une intégration optimale des différentes sources d'énergie avec des solutions éprouvées et des plans de formation-suivi continus. Un plan de maintenance rigoureux assurera la durabilité des installations.

IV. ETUDE DES COÛTS ECONOMIQUES

L'étude économique résumera pour chaque composante du projet le calcul des coûts d'investissement, l'étude sommaire de rentabilité basée sur une analyse financière, le calcul de divers indicateurs financiers tels que le Délai de Récupération du Capital Investi (DRCI), le Return Of Investment (ROI), la Valeur Actuelle Nette (VAN), le Taux de Rentabilité Interne (TRI) et le Bénéfice sur dix ans. Le calcul des LCOE de chaque source d'énergie complétera le tableau d'analyse économique.

Ces indicateurs permettent d'apprécier finement la rentabilité des investissements et évaluer à l'aune de critères techniques la pertinence d'injection de capital dans un projet d'autonomisation de ferme agricole intégré.

Les indicateurs mentionnés plus haut conditionnent également dans un business plan la facilité d'accès ou non à des crédits bancaires en vue de soutien du projet.

A. INVESTISSEMENT DANS LE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

1. Composantes

L'investissement dans le solaire comporte entre autres, l'acquisition auprès de fournisseurs chinois de :

- 40 panneaux solaires de 605 Wc, soit 24,20 kWc au total ;
- 1 onduleur hybride triphasé de 16 kW, 48V DC / 230V-400 V AC ;
- 24 batteries 12 V, 250 Ah LiFePO4, soit un pack de 1 500 Ah, 48 V ;
- Câbles de connexion et raccordement ;
- Coffret électrique de protection contenant 24 disjoncteurs de 5 A, 6 disjoncteurs de 16 A, 6 disjoncteurs de 10 A, 1 Parafoudre ;
- Accessoires de montage et raccordement.

2. Devis d'implantation du système solaire photovoltaïque

Le tableau 12 ci-dessous résume les meilleurs prix de fournisseurs chinois obtenus au 30 Avril 2025, avec un taux de change Dollar/XOF de 1/574. Le tableau détaillé se retrouve en annexe X.

Tableau 12 : Devis d'implantation du système solaire photovoltaïque

N°	Composants	Unité	Qté	Prix unitaire	Total (USD)
1	Panneaux bifacial Topcon Sun Plus series TW-605-HD-1 605Wc	U	40	56,1	2244
2	Onduleur hybride DEYE SUN-16k-SG05LP3-EU-SM2 3P_N_T	U	1	2120	2120
3	Batteries 12V 250Ah, LiFePO4	U	24	410	9840
4	Coffret électrique équipé & Câbles de raccordement	Ens.	1	600	600
5	Climatiseur split 12 000 BTU/h	U	1	440	440
6	Fret, douane, transport et taxes	Ens.	1	1430	1430
7	Nivellement, terrassement, génie-civil, confection supports	Ens.	1	1650	1650
8	Main d'œuvre travaux installations, tests, formation	Ens.	1	1100	1100
9	Total TTC				19424
10	Marge pour imprévus		1	971,2	986,64
11	Budget investissement photovoltaïque				20395,2

Source : www.madeinchina.com; enquête terrains.

3. Étude de rentabilité de la phase photovoltaïque

Notons les éléments suivants comme inputs de la prochaine équation :

N_p = Nombre de PV installés, soit 40

P_c = Puissance crête d'un PV, soit 605 W

H_e = Nombre d'heure moyen d'ensoleillement par jour, He = 6,2 h

E = Production annuelle d'énergie

a) Hypothèses de base

Les 40 panneaux produisent quotidiennement une quantité d'énergie Q_1 :

Q_1 = 40 x 605 Wc x 6,2 h x 0,75 = 112,53 kWh où

605 Wc est la puissance crête d'un panneau PV

6,2h le nombre moyen d'heures d'ensoleillement par jour

0,75 le ratio de performance. La valeur courante de ce ratio oscille entre 70 % et 80 % selon « *photovoltaïque.info*. »

Par contre la quantité d'énergie réelle nécessaire à couvrir par la production photovoltaïque est d'après le tableau de l'annexe II, de : Q_2 = 98,8 kWh

Nous observons un gap positif (Q_1 - Q_2) de 13,73 kWh par jour, soit 5 011,45 kWh par an pouvant être injecté sur le mini réseau d'alimentation des fermes voisines. A 0,26 USD le prix de revente du kWh, prix d'achat de l'énergie auprès de la SBEE, et en considérant une perte en ligne de 3 %, on a :

- M_1 = 0,26 x 5 011,45 x (1-0,03) = 1 263,88 USD comme une partie de l'économie réalisée grâce à la revente du surplus d'énergie.
- Taux d'actualisation : 10 % pour la VAN et le TRI.
- Coût d'acquisition du kWh électrique auprès de la SBEE : 0,26 USD pour la tranche de consommation supérieure à 250 kWh/mois.
- Investissement initial I : selon la ligne 11 du tableau 11 ci-dessus, la valeur I du CAPEX est :

I ≈ 20 396 USD

- Production annuelle d'énergie : $E = Np\ x\ Pc\ x\ He\ x\ 0{,}75\ x\ 365$

E = 40 x 605 x 6,2 x 0,75 x 365

E = 41 073,45 kWh/an

- Économie annuelle réalisée : $M2 = 0{,}26\ USD\ x\ E$

M_2 = 0,26 x 41 073,45

M_2 = 10 679,1 USD

On retient donc une économie annuelle de montant : M = M_1 + M_2 = 11 943 USD.

- Coût moyen Cm de maintenance annuelle : Entre 1-2% du CAPEX pour les systèmes PV suivant « *Guide IRENA, 2022 »*. Nous retiendrons une moyenne annuelle de 1,5 % du montant de l'investissement dans le solaire.
- Cm = 306 USD

b) Tableau des amortissements de l'investissement solaire

Tableau 13: Tableau des investissements dans le solaire

An	Économies (USD)	Maintenance (USD)	Cash-flow net (USD)	Cash-flow net cumulé (USD)	Cash-flow actualisé (USD)	Amortissement cumulé (USD)	Observations
0	_	_	-20396		-20396	-20396	
1	11943	306,00	11637	11637	10579	-8759	
2	11943	306,00	11637	23274	9617	2878	
3	11943	306,00	11637	34911	8743	14515	
4	11943	306,00	11637	46548	7948	26152	
5	11943	306,00	11637	58185	7226	37789	
6	11943	2806,00	9137	67322	5158	46926	Provision de 2500 USD : changement onduleur
7	11943	306,00	11637	78959	5972	58563	
8	11943	306,00	11637	90596	5429	70200	
9	11943	306,00	11637	102233	4935	81837	
10	11943	306,00	11637	113870	4487	93474	
	119430	5560,00	93474	_	49697	_	

Source : Autoproduction

c) Calcul des indicateurs de rentabilité

(1) Délai de Récupération du Capital Investi, DRCI

Le DRCI est un indicateur financier qui mesure le temps nécessaire qu'un investissement génère suffisamment de bénéfices pour rembourser l'investissement initial.

$$DRCI = (Investissement\ initial)/(Flux\ de\ trésorerie\ annuel)$$

A l'an 1, 11 637 USD ont été récupérés sur les 20 396 investis.

A l'an 2, les 8 759 USD restants seront récupérés au bout de 8 759 /11 637 = 0,7526 an

DRCI = 1,7526 soit 1 an 9 mois.

On retient DRCI = 1 an 7 mois.

(2) Retour sur Investissement, ROI

Le ROI est un indicateur financier permettant de mesurer la rentabilité d'un investissement, il évalue le rapport entre les bénéfices générés par un investissement et son coût initial.

$$ROI\ (\%) = (Gain\ total/Investissement)\ x\ 100$$

ROI = 100 x [(119 430 – 5 560) – 20 396] /20 396 = 4,5829

On retient donc que ROI = 458,29 %

(3) Valeur Actuelle Nette

La VAN est un indicateur financier permettant d'évaluer la rentabilité d'un investissement en tenant compte de la valeur temporelle de l'argent. Sa formule est :

VAN = ∑ [Cash-Flow / $(1 + i)^n$] – Investissement initial, où

i est le taux d'actualisation, il vaut 10% pour ce projet. Il correspond au taux de rendement minimum attendu pour le capital investi,
n est le nombre de périodes,

Par lecture du tableau 13, On a VAN = 49 697 USD

(4) Taux de Rentabilité Interne, TRI

Le TRI est un indicateur financier permettant d'évaluer la rentabilité d'un investissement, il représente le taux de rendement annuel moyen attendu d'un investissement sur sa durée de vie. Il est obtenu par annulation de la formule de la VAN. On retrouve TRI = 41,73 % par support de feuille de calcul Excel.

On retient TRI = 41,73 %

(5) Bénéfice net sur 10 ans

On retient à partir du tableau des amortissements que :

Bénéfice net sur 10 ans = 107 494 USD

(6) Synthèse des indicateurs financiers de l'investissement solaire photovoltaïque

Tableau 14: Synthèse des résultats de l'analyse financière du projet solaire

Ordre	Indicateur	Valeur	Interprétation
1	DRCI	1an 9 mois	Investissement récupéré en moins de 2 ans
2	ROI	458,29 %	Rentabilité très élevée
3	VAN (à 10%)	49 697 USD	Projet très rentable (VAN > 0)
4	TRI	41,73 %	Taux de rendement annuel attractif
5	Bénéfice Net sur 10 ans	93 474 USD	Gain net substantiel sur 10 ans

Source : Autoproduction

Les coûts d'achat de l'électricité au niveau du réseau national SBEE subissant une tension inflationniste permanente, il est à observer que ces indicateurs auront une tendance naturelle à s'améliorer au profit du projet solaire photovoltaïque.

(7) Calcul du LCOE de l'énergie solaire

Le LCOE, Levelized Cost of Energy ou Coût Actualisé de l'Énergie est un indicateur économique clé pour comparer différentes sources d'énergie. Il représente le coût total actualisé de production d'un MWh ou kWh d'électricité sur toute la durée de vie d'un projet, en tenant compte des investissements, de l'exploitation et de la production énergétique. C'est le rapport du coût total actualisé sur la durée de vie à la production totale d'électricité actualisée sur la durée de vie. Sa formule de base du LCOE est la suivante :

$$LCOE = [\Sigma (It + Mt + Ft) / (1 + r)^t] / [\Sigma (Et / (1 + r)^t)]$$

Où :

It = Coûts d'investissement à l'année t

Mt = Coûts d'exploitation et de maintenance à l'année t

Ft = Coûts de combustible à l'année t, Ft = 0 pour le solaire et l'éolien,

Et = Production d'électricité à l'année t

r = Taux d'actualisation, il vaut 10 % pour le présent projet comme stipulé plus haut,

t = Année et la durée de vie moyenne d'un projet solaire est de 25 ans.

Le tableau Excel de calcul du LCOE est en annexe XIV, nous trouvons : LCOE = 0,072 USD/kWh

En comparaison avec le tableau 3 de l'IRENA, résumé des coûts de production d'énergies renouvelables en 2023, qui affiche un LCOE solaire photovoltaïque de 0,044 USD/kWh, nous pouvons dire que le LCOE solaire trouvé est plus élevé de 63,63 % mais reste assez cohérent en rapport avec la petite taille de l'investissement qui ne favorise pas les économies d'échelle.

B. INVESTISSEMENT DANS L'EOLIEN

1. Composantes

Éolienne en kit complet VAWT 20 kW, 380 V y compris :

- 1 dispositif pitch de régulation et de freinage,
- le freinage d'urgence,
- le mat métallique de 35 mètres,
- les câbles de connexion et raccordement,
- 1 coffret électrique de protection des départs,
- 1 disjoncteur 4 x 40 A de départ,
- 3 disjoncteurs 4 x 25 A,
- 1 Parafoudre,
- Accessoires de montage et raccordement.

Le tableau 16 ci-dessous comporte la meilleure offre fournisseurs obtenue au 30 Avril 2025, avec un taux de change Dollar/XOF de 1/574. Le devis détaillé est en annexe X1.

2. Devis d'implantation du système éolien

Tableau 15 : Devis d'implantation de système éolien

Ordre	Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire	Total (USD)
1	Éolienne VAWT 20 kW avec mât de 35 mètres, contrôleur éolien et dump load.	U	1	11 000	11 650
2	Coffret électrique, Câbles et accessoires de raccordement	U	1	650	

3	Fret maritime, douane, transport, taxes et autres frais	Ens.	1	1 350	1 350
4	Nivellement, Terrassement et Génie civil	Ens.	1	1 400	1 400
5	Main d'œuvre Travaux installations-tests-Formation	Ens.	1	1 350	1 350
6	Total TTC				15 750
7	Marge pour imprévus		1	787,5	787,5
8	Budget Investissement Éolien				16 537,5

Source: R&X Energy Group.

Un investissement de 16 538 USD est nécessaire pour la phase éolienne du projet.

3. Étude de rentabilité de la phase éolienne

a) Hypothèses de travail

Au niveau de la section 4 consacrée au dimensionnement de l'éolienne, nous avons calculé au paragraphe d) par vérification de la puissance de l'éolienne que cette dernière produit 23,04 kWh/j pour des besoins nets de 21,2 kWh/j. La marge de 10 % pour des extensions futures nous avait fait prévoir un besoin étendu à 23,32 kW/j.

Un écart de 1,84 kWh par jour subsiste donc, soit 671,6 kWh/an, qui peut être exploité et injecté dans le mini-réseau local d'alimentation des fermes voisines.

A 0,26 USD le prix de revente du kWh, prix d'achat de l'énergie auprès de la SBEE et en considérant une perte en ligne de 3%, on a par analogie aux calculs de rentabilité de la phase solaire :

M_1 = 0,26 x 671,6 x (1-0,03) = 169,37 USD comme une partie de l'économie réalisée.

- Taux d'actualisation : 10 % pour la VAN et le TRI.
- Le facteur de charge du site est : 16 %
- CAPEX : I = 16 538 USD
- Production annuelle d'énergie par l'éolienne : E = 20 kW x 0,16 x 24h x 365j = 28 032 kWh

E = 28 032 kWh

- Économie annuelle réalisée M : M = M_1+M_2 où M_2 = 0,26 USD x E, soit M2 = 7 288 USD.

On retient donc M = 7457 USD.

- Coût moyen Cm de maintenance annuelle : 2-4% du CAPEX pour les systèmes éoliens de puissance inférieure à 100 kW suivant *Guide IRENA, 2022*.

Nous retiendrons une moyenne de 3 %. Soit, Cm = 497 USD.

b) Tableau des amortissements de l'investissement éolien

Tableau 16 : Tableau des amortissements de l'investissement éolien

Année	Économies (USD)	Maintenance (USD)	Cash-flow net (USD)	Cash-flow net cumulé	Cash-flow actualisé (USD)	Amortissement cumulé (USD)
0	_	_	-16538		-16538	-16538
1	7457	497,00	6960	6960	6327	-9578
2	7457	497,00	6960	13920	5752	-2618
3	7457	497,00	6960	20880	5229	4342
4	7457	497,00	6960	27840	4754	11302
5	7457	497,00	6960	34800	4322	18262
6	7457	497,00	6960	41760	3929	25222
7	7457	497,00	6960	48720	3572	32182
8	7457	497,00	6960	55680	3247	39142
9	7457	497,00	6960	62640	2952	46102
10	7457	497,00	6960	69600	2683	53062
	74 570	4 970,00	53 062	_	26 228	_

Source : Autoproduction

c) Calcul des indicateurs de rentabilité

Avec la même approche que le calcul des indicateurs de la phase solaire et sur la base du tableau 16 des amortissements ci-dessus, nous avons :

DRCI = 2,22 ans soit 2 ans 2 mois 19 jours

ROI = 320,84 %

VAN = 26 228 USD

TRI = 27,91 %

Bénéfice net sur 10 ans : 53 062 USD

d) Synthèse des indicateurs financiers de l'investissement éolien

Tableau 17 : Synthèse des résultats de l'analyse financière du projet éolien

Ordre	Indicateur	Valeur	Interprétation
1	DRCI	2,22 ans	Récupération de l'investissement en moins de 3 ans
2	ROI	320,84 %	Rentabilité très élevée
3	VAN (à 10%)	26 228 USD	Projet rentable (VAN > 0)
4	TRI	27,91 %	Rendement annuel attractif
5	Bénéfice Net sur 10 ans	53 062 USD	Profit substantiel

Source : Autoproduction

Les coûts d'achat de l'électricité au niveau du réseau national SBEE subissant une tension inflationniste permanente, il est à observer que ces indicateurs auront une tendance naturelle à s'améliorer au profit du projet éolien.

e) Calcul du LCOE de l'énergie éolienne

$$LCOE = [\Sigma (It + Mt + Ft) / (1 + r)^t] / [\Sigma (Et / (1 + r)^t)]$$

Où :

It = Coûts d'investissement à l'année t

Mt = Coûts d'exploitation et de maintenance à l'année t

Ft = Coûts de combustible à l'année t, Ft = 0 pour le solaire et l'éolien,

Et = Production d'électricité à l'année t

r = Taux d'actualisation, il vaut 10 % pour le présent projet comme stipulé plus haut,

t = Année et la durée de vie moyenne d'un projet éolien est de 20 ans.

Le tableau Excel de calcul du LCOE éolien est en annexe XV, nous trouvons : LCOE = 0,087 USD/kWh

En comparaison avec le tableau 3 de l'IRENA, résumé des Coûts de Production d'EnR en 2023, qui affiche un LCOE éolien on shore de 0,033 USD/kWh nous pouvons dire que celui trouvé dans le présent projet est 2,63 fois plus élevé.

Cette valeur pourrait s'expliquer par la petitesse du projet qui n'a généré aucune réduction d'échelle mais aussi par le faible facteur de charge du site de Djidja, faiblement venteux.

C. INVESTISSEMENT DANS LA METHANISATION

1. Hypothèses de travail

- Localisation : Ferme agricole intégrée à Djidja, Bénin.
- Production journalière : 2,51 m³ de biogaz.
- Composantes techniques :
  - Digesteur à dôme fixe (32 m³).
  - Gazomètre souple HDPE (1 m³).
  - Système de sécurité (détecteurs de méthane, extincteurs).
  - Réseau de distribution (150 m PVC, séparateurs d'eau, compteurs).

2. Étude de rentabilité du système de méthanisation

a) Données de base

- Le tableau de l'annexe XII indique un investissement global de 3 712 USD dans le système de méthanisation. On retient donc I = 3 712 USD
- Les économies réalisées par suppression de l'usage de 36 bouteilles de gaz de 13 kg est : 20,91 USD x 36 = 752,61 USD. Par ailleurs, la recette obtenue de la vente de digestat pour une production moyenne annuelle de 16,69 Tonnes au prix moyen de cession de 3 USD/Tonne est de 50,06 USD. On a donc une économie globale de M = 803 USD.
- les coûts de maintenance en rapport avec l'expérience du Projet SONGHAÏ à Porto-Novo au Bénin pour des digesteurs similaires sont de l'ordre de 2-3 % du montant du CAPEX, nous tiendrons compte d'une moyenne de 2,5 %.

On retient donc un coût moyen annuel de maintenance Cm = 0,025 x 3712 USD, soit Cm = 93 USD

b) Tableaux des amortissements

Tableau 18 : Tableau des amortissements de la phase méthanisation

N°	Année	Économies (USD)	Maintenance (USD)	Cash-flow net (USD)	Cash-flow net cumulé (USD)	Cash-flow actualisé (USD)	Amortissement cumulé (USD)
1	0	_	_	-3712		-3712	-3712
2	1	803	93	710	710	645	-3002
3	2	803	93	710	1420	587	-2292
4	3	803	93	710	2130	533	-1582
5	4	803	93	710	2840	485	-872
6	5	803	93	710	3550	441	-162
7	6	803	93	710	4260	401	548
8	7	803	93	710	4970	364	1258
9	8	803	93	710	5680	331	1968
10	9	803	93	710	6390	301	2678
11	10	803	93	710	7100	274	3388
Cumul		8030	930	3388	_	651	_

Source : Autoproduction

c) Calcul des ratios de rentabilité

Avec la même approche que les deux cas précédents et le support du tableau des amortissements 18 ci-dessus, nous obtenons :

DRCI = 5,23 ans soit 5 ans 2 mois 23 jours

ROI = 91,29 %

VAN = 651 USD

TRI =13,95 %

Bénéfice net = 3 388 USD

On retient que le projet de méthanisation présente une forte rentabilité.

D. INVESTISSEMENT DANS LE SOLAIRE THERMIQUE

Nous considérons les séchoirs solaires, les capteurs plans thermiques, les fours solaires et les concentrateurs solaires comme une seule composante. Le tableau des prix renseigné à l'annexe XIII est fait sur la base des surfaces de vitrage des fours solaires et de surfaces réfléchissantes équivalentes des cuiseurs solaires. Le nombre compense l'indisponibilité des grandes surfaces vitrées de captage et de surfaces réfléchissantes en miroir aluminium.

1. Données de base

Le tableau de l'annexe XIII indique un investissement global de 7728 USD dans le système de méthanisation. On retient donc I = 7728 USD

- Les économies réalisées par suppression de l'achat de 1440 kg de charbon (36 sacs de 40 kg) et 132 stères de bois (30 camionnettes bâchées) est de (5,23 USD x 36) + (43,56 USD x 30). On retient donc M = 1495 USD.
- Les coûts de maintenance annuelle sont estimés à 2 % du CAPEX, soit donc Cm = 155 USD.

2. Tableaux des amortissements

Tableau 19 : Tableaux des amortissements du solaire thermique

N°	Année	Économies (USD)	Maintenance (USD)	Cash-flow net (USD)	Cash-flow net cumulé	Cash-flow actualisé (USD)	Amortissement cumulé (USD)
1	0	_	_	-7728		-7728	-7728
2	1	1495	155	1340	1340	1218	-6388
3	2	1495	155	1340	2680	1107	-5048
4	3	1495	155	1340	4020	1007	-3708
5	4	1495	155	1340	5360	915	-2368
6	5	1495	155	1340	6700	832	-1028
7	6	1495	155	1340	8040	756	312
8	7	1495	155	1340	9380	688	1652
9	8	1495	155	1340	10720	625	2992
10	9	1495	155	1340	12060	568	4332
11	10	1495	155	1340	13400	517	5672
Cumul		14950	1550	5672	_	506	_

Source : Autoproduction

3. Calcul des ratios de rentabilité

Avec la même approche que les deux cas précédents et le support du tableau des amortissements ci-dessus, nous obtenons :

DRCI = 5,77 ans ; 5 ans 9 mois de délai de récupération du capital investi.

ROI = 73,4 % ; rentabilité satisfaisante.

VAN = 1 223 USD ; projet rentable car VAN supérieure à 0.

TRI =13,57 %,

Bénéfice net = 5 672 USD

On retient que la composante solaire thermique est aussi rentable.

4. Synthèse de l'étude économique de l'autonomisation énergétique de la ferme

Tableau 20: Synthèse des indicateurs de rentabilité

		Composantes du projet				
		Solaire photovoltaïque	Éolien	Méthanisation	Solaire thermique	Cumul
Taux d'actualisation (%)		10 %				
Investissement (USD)		20 396	16 538	3712	7728	48 374
Indicateurs de rentabilité	DRCI (Année)	1,75	2,22	5,23	5,77	-
	ROI (%)	458,29	320,84	91,29	73,4	-
	VAN (USD)	49 697	26 228	651	1223	77 799
	TRI (%)	41,73	27,91	13,95	13,57	-
	Bénéfice net sur 10 ans (USD)	93 474	53 062	3388	5672	155 596

Source : Autoproduction

A l'analyse, tous les critères de comparaison de rentabilité et de profitabilité positionnent le projet photovoltaïque comme meilleur investissement par rapport aux autres projets, bien que ces derniers soient aussi très attractifs.

Le tableau 20 indique un projet d'autonomisation très rentable dans toutes ses composantes avec :

- des DRCI compris entre 1,75 et 5,77 ans ;
- des ROI compris entre 73,4 % et 458,29 % ;
- un investissement de 48 374 USD générant sur 10 ans, 3,2 fois cette valeur en bénéfice net.

On peut dire qu'au vu des indicateurs financiers, le projet est non seulement globalement rentable, mails qu'il l'est sur chacune de ses composantes.

Par ailleurs, les prix du charbon de bois, du bois énergie, du gasoil, du gaz butane, du kWh énergie de la SBEE sont tous sous tension inflationniste, ce qui à terme contribue à améliorer davantage la rentabilité du projet.

En conclusion, sur la base des LCOE solaire et éolien respectifs de 0,072 USD/kWh et 0,087 USD/ kWh et des quantités d'énergies annuelles solaires et éoliennes produites 37 339,50 kWh et 25 483,64 kWh ; le coût moyen de l'énergie électrique produite l'an 1 est :

$$Qm = [(0{,}072\ x\ 37\ 339{,}50) + (0{,}087\ x\ 25\ 483{,}64)]\ /\ (37\ 339{,}50 + 25\ 483{,}64)$$

Le LCOE moyen de l'énergie électrique de la ferme produite la première année est donc de 0,078 USD/kWh contre 0,26 USD/kWh pour l'énergie électrique conventionnelle de la SBEE.

Sur ce projet, le LCOE électrique des énergies renouvelables est 69,97 % moins cher que l'énergie conventionnelle du réseau, soit un rapport de 1/3,33.

E. OPTIMISATION, RISQUES ET ATTENUATION.

1. Optimisation

Des pistes d'optimisation existent et peuvent être explorées. Il s'agit de :

- Planifier la production de biogaz avec des substrats à haut rendement induisant un tri primaire des déchets agricoles et ménagers de la ferme.
- Mettre en avant les réductions des émissions de CO_2 et autres gaz à effets de serre ainsi que l'absence d'utilisation d'engrais chimiques pour la recherche de financement, notamment des subventions des fonds verts du PNUD, de l'Union Européenne et du Fonds National de Développement Agricole du Bénin.
- Monétiser la gestion des déchets végétaux des fermes voisines.
- Monétiser la masse de carbone non émis sur le marché du carbone.
- Former le personnel local à la maintenance des batteries du système PV et des autres composantes du projet afin d'induire l'appropriation du matériel.
- Revendre l'énergie supplémentaire produite non autoconsommée sur un mini réseau implémenté par les fermes voisines.

2. Risques

- Fluctuation des prix du matériel importé, frais évolutifs de la douane.
- CAPEX élevé d'où nécessité de recherche des subventions du Fonds National pour l'Environnement au Bénin et d'autres organisations internationales impliquées dans l'environnement ou dans l'agriculture.
- Longs délais de livraison du matériel importé de Chine pouvant affecter les délais de livraison.

3. Atténuation des risques

- Une étude de terrain complémentaire et une mise à jour constante des inputs de dimensionnement garantirait la fiabilité des données.
- Une négociation de clauses de pénalité de retard avec les fournisseurs et les transitaires.
- La précision de la vitesse des vents par installation d'un anémomètre pour une campagne de mesures de six à douze mois.
- Faire une provision conséquente pour le remplacement des batteries au bout de 10 ans.

- Exiger des certificats de conformité aux normes européennes et/ou américaines avant acquisition des produits fabriqués en Chine.

V. DISCUSSIONS ET ANALYSES

A. APPRECIATION GENERALE DU MIX ENERGETIQUE PROPOSE

L'autonomisation énergétique de la ferme se distingue par la diversité des sources exploitées : solaire photovoltaïque, éolien, méthanisation, solaire thermique. Ce choix stratégique répond à la triple exigence d'assurer la sécurité énergétique du site, de minimiser la dépendance aux énergies fossiles et de s'adapter aux ressources locales disponibles.

Le mix mis en place apparaît robuste, combinant :
- une puissance photovoltaïque de 24,2 kWc avec 40 panneaux de 605 Wc,
- une éolienne VAWT de 20 kW, 48 V-380 V dimensionnée pour couvrir 23,32 kWh/j,
- un système de batteries LiFePO4 pour garantir la continuité de l'alimentation,
- des dispositifs thermiques solaires pour l'eau chaude sanitaire et le séchage,
- la valorisation des déchets organiques par la méthanisation (2,51 m^3/jour de biogaz).

Des études similaires menées en Afrique confirment l'efficacité de telles approches hybrides. Ainsi, au Burkina Faso, un projet combinant 30 kWc de photovoltaïque et 20 kW d'éolien a permis de couvrir jusqu'à 92% des besoins électriques d'une exploitation laitière (Ouédraogo et al., 2021), tandis qu'au Sénégal, un projet mené par ENDA Énergie a démontré qu'un couplage biogaz-solaire pour la cuisson permettait de réduire de plus de 70 % l'utilisation de bois dans les fermes horticoles (Fall et al., 2018).

B. ANALYSE CRITIQUE DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

1. Dimensionnement et couverture des besoins électriques

Avec un besoin quotidien de 110 kWh/j à couvrir par le solaire photovoltaïque, la ferme s'est dotée d'un système de puissance 24,2 kWc couplé à une éolienne. La production journalière théorique des PV sous 5,2 kWh/m2/jour d'ensoleillement moyen est d'environ 125,66 kWh/j, ce qui laisse une marge. De plus, l'éolienne VAWT de 20 kW, ajoute 23,04 kWh/j et permet de stabiliser l'alimentation lors des baisses de niveau d'ensoleillement en saison des pluies et de réduire la sollicitation des batteries, augmentant ainsi leur durée de vie.

2. Capacité de stockage et autonomie

Les 24 batteries LiFePO4 de 12V-250Ah offrent une capacité brute de 72 kWh. En considérant un DoD de 80% (propre au LiFePO4), cela garantit environ 57,6 kWh utiles, soit un peu plus de 12 heures d'autonomie. Ce dimensionnement est cohérent, mais montre que le système reste dépendant d'une production quotidienne régulière et qui est justement assuré par le couplage hybride éolien-solaire.

Selon les recommandations de l'IRENA, « Statistiques de production des énergies renouvelables, 2016 », pour des sites isolés avec charges agricoles, un stockage équivalant à 0,5 jour de consommation est optimal économiquement. Cela conforte le choix effectué, même si un léger surdimensionnement renforcerait la résilience en ajoutant toutefois de nouvelles contraintes financières.

3. Apports et limites des dispositifs solaires thermiques

a) ECS pour l'écotourisme

Le capteur plan de 2,01 m² et 300 litres de stockage alimentant 6 bungalows permet de couvrir les besoins d'ECS estimés à 30-50 litres/jour/personne pour des usages courants (douches, lavabos), conformément aux standards FAO, 2016. Ces installations participent à l'attractivité du site grâce à des hébergements écotouristiques te qualité.

b) Séchoirs solaires pour la valeur ajoutée

Les deux séchoirs de 4 m^2 de surface et 6,5 m³ de volume de chambre chacun, équipés de capteurs plans, permettent de traiter environ 42 kg/jour de maïs, mangues ou riz selon la

spéculation. Ce dispositif réduit les pertes post-récoltes estimées à 30-40 % pour ces produits au Bénin (FAO, 2020).
Comparativement, un projet de séchage solaire conduit à Kpalimé au Togo sur des volumes similaires (40 kg/j) a permis d'augmenter de 50 % le revenu net des producteurs grâce à la vente hors saison (Yao et coll., 2019).

c) Limites observées

Le séchage reste tributaire des conditions climatiques journalières. Comme le suggèrent *Bala et al., 2020,* pour les séchoirs solaires mixtes, intégrer un appoint biogaz pourrait sécuriser le processus en cas de séquences nuageuses prolongées.

4. Impacts de la méthanisation et de la substitution du gaz

Le digesteur de 32 m³ produit en moyenne par jour 2,51 m³ de biogaz, destiné à remplacer environ 39 kg de butane mensuel pour la cuisine du restaurant.

a) Analyse comparative

Selon la FAO (2013), 1 m³ de biogaz équivaut à 6 kWh thermique, soit 1h de feu pour un ménage. La production quotidienne de 2,51 m³ de biogaz correspond donc à 15,06 kWh thermiques, largement suffisants pour alimenter la cuisine collective pendant quelques heures.
En Côte d'Ivoire, des bio digesteurs de taille similaire, 30-35 m³, installés sur des fermes laitières ont généré 2,8-3,0 m³/j de biogaz, *Koné et al., 2018* : ces chiffres donnent un indice sur la fiabilité des travaux projetés à Djidja

b) Atouts et recommandations

Le système valorise les effluents organiques, réduit les émissions de méthane directes et améliore l'hygiène. Toutefois, la taille limitée du gazomètre (1 m³) impose une utilisation journalière stricte, sous peine de torchage. Il serait judicieux, pour la suite, d'augmenter la capacité de stockage ou s'équiper de petits réchauds artisanaux pour absorber les pics. Aussi, la possibilité offerte au système de méthanisation de renforcer le séchage des produits de la ferme en cas de faible ensoleillement contribuera à limiter les opérations de torchage du biogaz stocké.

5. Réduction des usages de bois et impacts environnementaux

Les fours solaires et cuiseurs paraboliques, grâce à des plages de température de fonctionnement respectives de 150-180 °C et 250-280°C, permettent de supprimer l'utilisation annuelle de 1 440 kg de charbon de bois et 132 stères de bois.
Selon l'Agence Française pour le Développement (2018), la combustion de 1 kg de charbon produit environ 2,8 kg de CO_2 eq. C'est 4,032 tonnes CO_2 eq économisées annuellement, sans compter les émissions évitées par la coupe de bois vert estimée à 1,9 kg CO_2 eq par kg de bois sec brûlé.

L'analyse environnementale qui en résulte est que cette réduction contribue directement aux engagements climatiques du Bénin, qui vise -21,4 % d'émissions du secteur AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Use) à l'horizon 2030.

6. Place de l'écotourisme dans la résilience économique

L'intégration des bungalows et du restaurant utilisant l'énergie verte, couplée aux visites pédagogiques autour de la ferme autonome, constitue un levier économique essentiel. Le cas du Centre Songhaï au Nigeria (UNIDO, 2017) montre que l'écotourisme peut représenter jusqu'à 30 % des revenus d'une exploitation agro-énergétique, tout en sensibilisant les visiteurs à la transition énergétique. Comme perspectives, Il conviendrait de développer des packs touristiques combinant nuitées, visite des installations (séchoirs, capteur plan, bio digesteur, éolienne, ferme solaire) et ateliers de transformation agroalimentaire, pour maximiser les retombées financières.

En synthèse, le projet d'autonomisation de la ferme FIS de Djidja illustre une démarche intégrée particulièrement pertinente, combinant :
- des technologies diversifiées et adaptées aux ressources locales,
- une logique circulaire (valorisation des déchets par méthanisation, substitution des combustibles fossiles),
- une ouverture vers l'écotourisme pour renforcer la résilience financière.

Toutefois, la pérennité du modèle dépendra de :
- la mise en place d'un solide programme de maintenance et de formation locale,

- l'optimisation future des capacités de stockage (biogaz et batteries),
- l'accompagnement institutionnel pour soutenir la réplication à plus grande échelle.

Ces résultats renforcent la littérature existante sur les microsystèmes hybrides agricoles en zone tropicale, et ouvrent la voie à des recherches appliquées sur le suivi des performances à moyen terme, les impacts socio-économiques détaillés, ainsi que sur les possibilités d'injection des surplus d'énergie dans des mini réseaux ruraux.

7. Analyse des coûts de production et des ratios de rentabilité

La ferme FIS qui cherche à disposer d'énergie électrique à meilleur coût sans dépendre du réseau national SBEE, d'ailleurs inexistant, développe des projets d'énergies renouvelables présentant des avantages économiques majeurs, mais des écarts de performance significatifs.

a) Compétitivité des Coûts (LCOE)

Tableau 21: Comparaison des LCOE

Ordre	Indicateur	Projet solaire	Projet éolien	Benchmark IRENA 2023
1	LCOE (USD/kWh)	0,072	0,087	Solaire : 0,044 Éolien : 0,033
2	Écart Vs SBEE (0,26 USD/kWh)	- 72,30 %	- 66,54%	-
3	Écart vs Benchmark mondial	+ 55,38 %	+ 163,64%	-

Analyse :

- Le solaire est ultra-compétitif : son LCOE est 3,6 fois inférieur au tarif SBEE mais dépasse de 55,38 % la moyenne mondiale traduisant la faiblesse de l'investissement qui ne permet pas d'assurer des économies d'échelle.
- L'éolien est moins compétitif : son LCOE dépasse de 163,64 % la moyenne mondiale, reflétant des défis locaux tels que la limitation des ressources vent et les coûts d'installation.

b) Rentabilité et Délais de Retour

Tableau 22 : Comparaison des ratios de rentabilité financière solaire et éolien

Ordre	Indicateur	Projet Solaire	Projet éolien
1	DRCI (ans)	1,75	2,22
2	ROI (%)	458,29	320,84
3	VAN (USD	49 697	26 228
4	TRI (%)	41,73	27,91
5	Bénéfice net (10 ans)	93 474	53 062

- Analyse projet solaire
  - Un DRCI de 1,75 an ; moins de 24 mois ; est peu courant, permettant un réinvestissement rapide.
  - Le ROI de 458,29 % et le TRI de 41,73 %, bien au-dessus du taux d'actualisation de 10 %, confirment une excellente rentabilité.
- Analyse projet éolien
  - Malgré un TRI de 27,91 %, bien supérieur au taux d'actualisation de 10 %, sa rentabilité est 1,5 fois inférieure au solaire.
  - La VAN éolienne de 26 228 USD représente seulement 52,77 % de la VAN solaire.

c) Facteurs Clés de Performance

- Avantage solaire :
  - Durée de vie étendue, 25 ans contre 20 ans pour l'éolien, amplifiant le bénéfice à long terme.
  - OPEX prévisibles et faibles, pas de pièces mobiles, contrairement à l'éolien qui impose la maintenance des turbines.

- Défis éoliens :
  - CAPEX et OPEX, plus élevés par kWh produit.
  - Ressource vent potentiellement sous-optimale à Djidja comparativement aux benchmarks internationaux.

Implications économiques :

- Économies par rapport à la SBEE :

- Solaire : Économise 0,188 USD/kWh. C'est 72,31 % de réduction par rapport aux coûts SBEE.

- Éolien : Économise 0,173 USD/kWh. C'est 66,54 % de réduction par rapport aux coûts SBEE. L'éolien reste toutefois 26 % plus cher que le solaire.

- Bénéfice agrégé :

- Sur 25 ans, le solaire génère un bénéfice net théorique de plus de 233 685 USD contre 132 655 USD pour l'éolien. Cet écart devrait s'accentuer au détriment de l'éolien, ce dernier ayant une plus faible durée de vie et devrait connaitre à priori un remplacement, donc de nouveaux investissements, avant les 25 ans.

d) Analyse des Risques

Tableau 23 : Comparaison des principaux risques

Ordre	Risque	Impact solaire	Impact éolien
1	Variabilité climatique	Faible, ensoleillement stable	Élevé, vents imprévisibles
2	Maintenance	OPEX bas et linéaire	OPEX élevé, pièces mobiles
3	Adéquation technologique	Optimale pour Djidja	Sous-optimale (LCOE + 163,64 % vs IRENA)

e) Recommandations

(1) Prioriser le solaire

- Solution la plus rentable et rapide à déployer (DRCI < 20 mois).
- Potentiel massif de déploiement et d'extension pour alimenter la ferme en énergie.

(2) Intégrer l'éolien en complément

- Développer des micro-réseaux hybrides solaire + éolien uniquement pour assurer la continuité dans la disponibilité de l'énergie.
- Cibler des turbines de dernière génération pour réduire le LCOE.

(3) Modèle économique :

- Vendre l'excédent au micro-réseau rural d'alimentation des fermes voisines à un tarif négocié identique à celui de la SBEE 0,26 USD/kWh. Cela créerait une nouvelle source de revenus.
- Utiliser les subventions climatiques (Fonds Vert Climat) pour réduire le CAPEX éolien.

(4) Impacts socio-économiques :

- Création d'emplois locaux : Formation technique à l'installation/maintenance solaire et éolien.
- Disponibilité de l'électricité et à des coûts compétitifs : ceci contribuera à booster le développement des fermes voisines et par ricochet de la localité.

f) Conclusion

- Le solaire est la solution optimale pour Djidja : LCOE bas (0,072 USD/kWh), ROI record (458,29 %) et délai de retour express (1,75 an).
- L'éolien reste viable même s'il pâtit de la faiblesse des ressources vent. Son rôle d'assurance de continuité de production aux heures de faible ensoleillement renforce sa place dans le mix énergétique.
- La stratégie gagnante sera de prioriser le solaire dans les phases d'extension future du projet tout en déplaçant l'exécution de certaines tâches, qui peuvent l'être, de la nuit vers la journée.

VI. ÉTUDE DES IMPACTS, LIMITES ET PERSPECTIVES DU MODELE PROPOSE

A. LES IMPACTS DE L'AUTONOMISATION ENERGETIQUE DE LA FERME

1. Impacts économiques

Les impacts économiques ont été précédemment étudiés en termes d'investissements et de ratios financiers, nous abordons ici les économies observées sur le budget de la ferme. Ils font trait à la :

- Suppression du budget gasoil pour les générateurs 13 kVA et 27 kVA et le moulin à céréales initialement utilisés sur la ferme pour diverses activités. Pour rappel, ce poste de dépense annuelle s'élevait en moyenne à 4 155 400 XOF, soit 7 238 USD sur les trois dernières années.
- Suppression des frais de maintenance des groupes électrogènes, ils se chiffraient en achat et réparation à 157 800 XOF, soit 275 USD en moyenne sur les trois dernières années.
- Suppression des approvisionnements en pétrole lampant qui était de 43 700 XOF, soit 76 USD.
- Suppression des postes de dépenses en bois et charbon de bois nécessaires à la transformation du manioc en gari et à la stérilisation par cuisson des bouteilles et autres emballages. Ce poste consommait 1495 USD par an.
- Perception de recettes provenant des ventes de compost et digestat estimé à quelques dizaines de dollars.
- Perception de cash-flows issus de la revente d'énergie aux fermes voisines.

La ferme FIS se donne désormais les moyens énergétiques d'assurer une autonomie quasi complète et de financer d'autres investissements dans la modernisation des outils et pratiques agricoles.

2. Impacts socio-culturels

Certains impacts positifs à observer sont :

- Réduction de diverses contraintes et pénibilités liées à l'acquisition de gasoil, du bois et charbon de bois.

- Amélioration des conditions de travail sur la ferme, moins de fumées, niveau de bruit plus faible..
- Valorisation des déchets agricoles par méthanisation.
- Séchage solaire améliorant la qualité des produits et réduisant les pertes post-récolte.

D'autres impacts s'érigent en termes de défis, tels :

- La nécessité de formation sur la maintenance et le suivi permanent des installations.
- L'acceptation culturelle du biogaz induite par les odeurs émanant de la gestion des digesteurs.

3. Impacts environnementaux

a) Impacts positifs

Nous citons essentiellement les émissions évitées grâce à la suppression :

- des usages de gasoil des groupes électrogènes et moulin à céréales et leur corollaire de bruits et fumées,
- de gaz butane avec un effet direct sur la déforestation.

Aussi, nous pouvons rappeler :

- La réduction de la pollution de l'air (particules, NOx, SOx).
- La baisse de la pression sur les forêts locales.

A contrario des impacts positifs, nous observerons également quelques conséquences environnementales.

b) Conséquences environnementales

Nous rappelons :

- Les batteries à durée de vie de 10 ans dont le recyclage est à organiser.
- L'impact paysager lier à la présence de l'éolienne.
- Les fuites de méthane présent dans le biogaz.

Si l'exploitation est mal gérée, ces fuites se révéleront désastreuses pour l'environnement en ceci que le potentiel de réchauffement global (PRG) du méthane, principal constituant du biogaz est 25 à 28 fois supérieur à celui du CO_2 sur 100 ans.

B. LIMITES ET AXES D'AMELIORATION DU MODELE

1. Limites du modèle proposé

- Intermittence : Soleil/vent variables peut engendrer un risque de déficit énergétique en saison pluvieuse.
- Dépendance aux importations : Les équipements solaires et éoliens fabriqués en Chine induisent une empreinte carbone du transport plus élevée. C'est l'équivalent de 0,5 t CO_2 par tonne de marchandises sur 12 000 km.
- Méthanisation : Besoin continu de 2,51 m^3/j en moyenne de biogaz, c'est l'équivalent de 125 kg de déchets/jour.
- Coût initial élevé, malgré les subventions possibles.

2. Perspectives globales

- La reproduction du modèle est envisageable sur les fermes ouest-africaines pour des niveaux d'ensoleillement proches de 5 kWh/m^2/j et des disponibilités conséquentes de biomasse comme les déchets agricoles et le fumier. Toutefois, les facteurs déterminants restent la volonté des exploitants agricoles et le niveau d'engagement des ouvriers et autres acteurs agricoles locaux.
- La ferme agricole autonome peut se projeter comme un centre d'apprentissage des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement mais aussi un atelier de maintenance des systèmes et matériels d'énergies renouvelables.
- La mise en place de production exclusive biologique avec des certifications européennes ou américaines contribuera à renforcer la résilience de la ferme par la pratique de premiers prix renforçant le chiffre d'affaire de la ferme.
- L'alignement du projet sur les objectifs de développement durable (ODD) tels que ODD 7 (énergie propre), ODD 13 (climat), et ODD 15 (vie terrestre) facilite l'accès aux subventions et financements des ONG et institutions internationales telles l'Union Européenne et la Banque Mondiale.

C. BILAN CARBONE DU PROJET

1. Émissions générées de carbone

a) Hypothèses de travail

- Durées de vie des équipements :

- Panneaux PV, éolienne, câbles, méthaniseur : 20 ans.
- Onduleur et batteries : remplacés à 10 ans (doublement des émissions de fabrication et transport).
- Poids transport :
  - Emballages inclus (+ 5 % du poids brut).
  - Transport de remplacement : uniquement pour onduleur et batteries.
- Volume béton méthaniseur : 10 m³ estimés pour 32 m³ de méthaniseur (structure + voûte).
- Facteurs transport :
  - Maritime : 0,01 kg CO_2/t·km (conteneur complet, Chine → Bénin).
  - Routier : 0,1 kg CO_2/t·km (camion >16t, Bénin).
  - Distance Chine- Bénin : 12 000 km
  - Distance Ferme FIS – Port de Cotonou : 160 km

b) Calcul des émissions générées de carbone

Tableau 24 : Tableau synthétique des émissions générées

Émissions/poste	Poids	Durée de vie	Calcul des émissions tCO_2 sur la durée de vie	Total (tCO_2/an)	Référence et Sources bibliographiques
Panneaux PV (40 x 605 Wc)	40 x 33,2 kg = 1328 kg	25	Fabrication & distribution : 40 x 0,605 Wc = 24,2 kWc 24,2 kWc x (1500 $kgCO_2$/kWc) = 36,3 t	1,452	Frischknecht et al. (2016), IEA PVS Task 12
Onduleur Hybride 20 kW	51,9 kg	10	Fabrication & distribution : 20 kW x (200 $kgCO_2$/kW) = 4 t	0,4	Hertwich et al. (2015), PNAS
Batteries (24 x 12V/250 Ah)	24 x 31,6 kg = 758,4 kg	10	Fabrication & distribution : 24 x (12 V x 250 Ah) = 72 kWh 72 kWh x 20 $kgCO_2$/kW = 1,44 t	0,144	Rydh & Sandén (2005), Energy Conversion and Management
Éolienne. VAWT 20 kW	465 kg	20	Fabrication & distribution : 20 kW x (2000 $kgCO_2$/kW) = 40 t	2	Garrett & Ronde (2013), The International Journal of LCA
Capteur plan solaire à thermosiphon double panneaux et ballon de 300 l	156 kg	20	Fabrication & distribution capteur : 4,02 m² × 150 kg CO_2/m²= 0,603 t Fabrication & distribution ballon : 1 * 200 $kgCO_2$ = 0,2 t	0,04	Weiss et al. (2016), Solar Energy Materials.
Câbles et accessoires de raccordement	100 kg	20	Fabrication & distribution : 100 kg x (5 $kgCO_2$/kW) = 0,5 t	0,025	Ecoinvent v38 (2023)

Méthaniseur 32 m³ (10 m³ de béton)	_	30	Fabrication : 10 m³ x (300 kgCO_2/m³) = 3 t	0,1	Hammond & Jones (2011), Inventory of Carbon & Energy.
Transport maritime initial	°	_	Poids total des équipements (avec emballages + 5 %) : (1328 + 51,9 + 758,4 + 465 +156 + 100) x 1,05 = 3 t. En volume, c'est l'équivalent d'un tiers de conteneur. 6 Bilan : 1/3 x 0,01 kg CO_2/t·km x 3t x 12 000 km = 0,12 t	0,12	Base carbone ADEME (2023),
Transport routier initial	_	_	0,1 kg CO_2/t·km x 3t x 160 km = 0,048 t	0,048	Base carbone ADEME (2023),
Transport maritime de remplacement	_	_	Poids total des équipements (avec emballages + 5 %) : (51,9 + 758,4) x 1,05 = 0,85 t. En volume, c'est l'équivalent d'un trentième de conteneur. Bilan : 1/30 x 0,01 kg CO_2/t·km x 0,85t x 12 000 km = 0,0034 t	0,0034	Base carbone ADEME (2023),
Transport routier de remplacement	_	_	0,1 kg CO_2/t·km x 0,85 t x 160 km = 0,0136 t	0,0136	Base carbone ADEME (2023),
TOTAL				3,946	

Sur la base de ce tableau, la valeur globale des émissions tonnes équivalent carbone générées sur la durée de vie moyenne de 20 ans du projet est de : 20 x (1,452 + 0,4 + 0,144 + 2 + 0,04 +0,025 + 0,1) + 0,12 + 0,048 + 0,0034 + 0,0136 = 83,41 t

Valeur globale des émissions tonnes équivalent sur 20 ans du projet : 83,41 t

2. Émissions évitées de carbone

a) Hypothèses de travail

- Facteurs de combustion :
  - Diesel/huile moteur : 3,18 kg CO_2/L (ADEME)
  - Butane : 3,03 kg CO_2/kg (ADEME)
  - Pétrole lampant : 3,15 kg CO_2/L (ADEME)
  - Bois : 1,9 t CO_2/stère (GIEC, humidité 20%)
- Transport :

- Distance aller-retour = distance simple × 2
- Camionnette (Peugeot 404) : 0,25 kg CO_2/km (Véhicule utilitaire essence 3.5-7.5t)
- Moto : 0,1 kg CO_2/km
- Conversion bois :
- 1 stère = 450 kg de bois sec (équivalence standard)

- Détails Logistiques :
- Gasoil : 6 925 litres transportés par lots de 200 litres implique 35 voyages (32 km × 2 = 64 km/voyage)
- Butane : 36 bouteilles transportées par lots de 2 bonbonnes, induit 18 voyages (64 km/voyage)
- Bois (132 stères) : 18 voyages (64 km/voyage)
- Charbon de bois (1 440 kg) : 2 voyages (12 km × 2 = 24 km/voyage)

b) Calcul des émissions évitées

Tableau 25 : Tableau des émissions CO2 évitées

Source d'énergie	Poids	Calcul des émissions tCO_2	Total (tCO_2/an)	Référence et Sources bibliographiques
Groupe Électrogène & Moulins à céréales	Combustion Gasoil	6925 L x 3,18 $kgCO_2$/L = 22,022 t	22,022	ADEME Base Carbone (2023)] (https://bilans-ges.ademe.fr/) - Fiche ID 168 (Gazole)
	Combustion partielle huile moteur	0,1 x 50 L x 3,18 $kgCO_2$/L = 0,0159 t	0,0159	
	Transport Gasoil	35 voyages x 64 km x 0,25 $kgCO_2$/km = 0,560 t	0,144	ADEME Base Carbone (2023)] (https://bilans-ges.ademe.fr/) - Fiche ID 26301 (VUL essence, 3.5-7.5t
	Transport huile moteur	1 voyage x 64 km x 0,1 $kgCO_2$/km = 0, 0064 t	0, 0064	ADEME Base Carbone (2023)] (https://bilans-ges.ademe.fr/) - Fiche ID 2615 (Moto) | 0.006
Gaz butane	Combustion	36 bouteilles x 13 kg x 3,03 $kgCO_2$/kg = 1,418 t	1,418	ADEME Base Carbone (2023)](https://bilans-ges.ademe.fr/) - Fiche ID 2615 (Moto) | 0.115.
	Transport Bonbonne	18 voyages x 64 km x 0,1 $kgCO_2$/km = 0, 1152 t	0, 1152	ADEME Base Carbone (2023)] (https://bilans-ges.ademe.fr/) - Fiche ID 2615 (Moto) | 0.115
Pétrole lampant	Combustion	72 L x 3,15 $kgCO_2$/L = 0,2268 t	0,2268	ADEME Base Carbone (2023) (https://bilans-ges.ademe.fr/) - Fiche ID 255 (Pétrole lampant
Bois énergie	Combustion	132 stères x 1,9 t CO_2/stère = 250,8 t	250,8	GIEC (2019) - Vol. 2, Ch. 2
	Transport	0,1 kg CO_2/t·km x 3t x 160 km = 0,048 t	0,048	Base carbone ADEME (2023),

Charbon de bois	Combustion	(1440 kg/450 kg) stères x 1,9 t CO_2/stère = 6,080 t	6,080	GIEC (2019) - Vol. 2, Ch. 2
	Transport	2 voyages x 24 km x 0,25 kg CO_2/km = 0,012 t	0,012	ADEME Base Carbone (2023)] (https://bilans-ges.ademe.fr/) - Fiche ID 26301 (VUL essence, 3.5-7.5t
Total			280,89	

Sur la base de ce tableau la valeur globale des émissions tonnes équivalent carbone évitées par année est de : 280,89 t.

Le CO_2 résultant de la combustion du bois est normalement biogénique et n'est pas compté comme émissions fossiles lorsque le prélèvement est durable. Nous ne sommes pas dans ce cas, le prélèvement est même du genre sauvage, le CO_2 est donc comptabilisé dans l'inventaire des flux physiques.

3. Bilan net des émissions CO_2

Pour un volume de CO_2 générés par le projet d'autonomisation énergétique de 3,946 t annuel contre 280,39 t évités, le projet dégage un gain positif de 276,44 tonnes chaque année au bénéfice de l'environnement. Ce substantiel gain peut être négocié sur le marché du Carbone contre des cash-flows.

En Conclusion le projet est viable avec un impact climatique net positif dès la première semaine. Il sera recommandé de :

1. Monitorer la production énergétique pour optimiser les ventes d'énergie aux fermes voisines.
2. Former et coacher continuellement les utilisateurs en maintenance des équipements et sécurité biogaz.
3. Étendre le modèle avec des financements par subventions diverses,
4. Réduire l'empreinte carbone transport dans la gestion de la maintenance et des remplacements des pièces de rechange.

Le potentiel de transformation à l'échelle régionale est important si le concept est intégré dans des politiques agricoles durables

CONCLUSION

Le présent travail, consacré à l'autonomisation énergétique de la ferme agricole intégrée FIS à Djidja, a permis d'explorer de manière approfondie les potentialités, les technologies disponibles et les impacts liés à la mise en œuvre d'un mix énergétique local et durable. L'analyse a été conduite dans un contexte marqué par l'impérieuse nécessité de renforcer la résilience énergétique des exploitations rurales, tout en contribuant à la transition vers des systèmes sobres en carbone et adaptés aux réalités socio-économiques locales.

L'étude a d'abord mis en évidence les importantes contraintes énergétiques qui freinent le plein essor des activités agricoles et agroalimentaires de la ferme. En effet, les besoins énergétiques sont variés et croissants, allant de la production d'électricité pour les équipements (pompes, incubateurs, moulins, éclairage, bureaux) à la fourniture de chaleur pour les procédés de transformation agroalimentaire (séchage, cuisson, conservation), sans oublier l'énergie mécanique pour certaines opérations spécifiques. Les analyses ont montré que l'approvisionnement par le réseau électrique national est inexistant tandis que le recours aux énergies fossiles comme le gasoil des groupes électrogènes, le gaz butane, le bois et le charbon de bois demeure onéreux et environnementalement préjudiciable à toute la communauté.

Face à ce diagnostic, la proposition d'un mix énergétique hybride et complémentaire s'est imposée comme une solution pertinente et urgente. Elle repose sur l'association judicieuse de quatre grandes filières renouvelables :

- le solaire photovoltaïque pour la production d'électricité,
- l'éolien pour renforcer la fourniture électrique, notamment en périodes nocturnes ou lors des jours à couvertures nuageuses,
- la méthanisation par bio digesteur pour valoriser les résidus organiques (déjections animales, déchets végétaux) en biogaz destiné à la cuisson et éventuellement à la production de chaleur,
- le solaire thermique, décliné sous forme de capteurs plans pour l'eau chaude, de séchoirs solaires et de fours/cuiseurs solaires pour réduire la consommation de bois énergie et améliorer la qualité des productions agricoles transformées.

L'étude technique a permis de dimensionner chacun de ces systèmes en fonction des besoins spécifiques d'aujourd'hui et ceux projetés incluant de fait une nouvelle composante écotourisme, gîtes et couverts, sur la ferme intégrée. Les calculs ont montré que le solaire photovoltaïque couplé à un système de stockage permettrait de couvrir partiellement les besoins

électriques diurnes et partiellement nocturnes. L'éolienne à axe vertical, dimensionnée selon les vitesses de vent à Djidja, vient en appoint pour sécuriser l'approvisionnement. La méthanisation, quant à elle, garantit un traitement efficace des biomasses tout en produisant du biogaz qui remplace le bois ou le gaz fossile pour les cuisines du restaurant. Les dispositifs thermiques solaires complètent l'ensemble, en couvrant des usages directs de chaleur, essentiels pour l'optimisation des coûts et la qualité des produits finis : séchoirs pour fruits, légumes et poissons, cuiseurs solaires pour la transformation des noix de palme, la torréfaction du gari et la pasteurisation des produits alimentaires transformés sur la ferme.

Au-delà des aspects techniques et économiques, ce projet d'autonomisation énergétique revêt un intérêt écologique et social majeur. Il permet de réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre, de diminuer la pression sur les ressources forestières locales, et d'améliorer la santé des employés, des usagers de la ferme et des populations riveraines en réduisant l'exposition aux fumées toxiques issues de la combustion traditionnelle du bois. De plus, le recours à des énergies renouvelables stimule la création d'emplois locaux liés à la fabrication, l'installation et la maintenance des équipements, tout en favorisant le transfert de compétences au profit des jeunes et des femmes.

Toutefois, la mise en œuvre effective de ce mix énergétique reste conditionnée par certains défis : la nécessité d'un accompagnement financier adapté par subventions et micro-crédit vert, la formation continue des exploitants et techniciens, et l'adoption de politiques publiques cohérentes favorisant l'investissement dans les énergies propres à l'échelle locale.

En somme, l'autonomisation énergétique de la ferme FIS au travers du mix énergétique retenu, constitue une réponse innovante et durable face aux problématiques énergétiques rurales. Elle démontre qu'il est possible de bâtir un modèle agro-écolo-énergétique résilient, qui contribue à la sécurité énergétique, à la sécurité alimentaire, à la lutte contre la pauvreté et à la préservation de l'environnement. Pour pérenniser et multiplier ce type d'initiative, il serait pertinent d'envisager la mise en réseau de plusieurs fermes intégrées autour de plateformes techniques communes, soutenues par des partenariats publics-privés et une stratégie territoriale cohérente. Ainsi, ce projet pourrait devenir un levier pour la transformation structurelle du secteur agricole béninois, en phase avec les objectifs de développement durable et les engagements climatiques du pays.

RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES

À l'issue de cette étude sur l'autonomisation énergétique de la ferme agricole intégrée FIS à Djidja, il apparaît indispensable de formuler un ensemble de recommandations pratiques et de tracer des perspectives en vue d'assurer la viabilité, la durabilité et la reproductibilité du projet.

Recommandations techniques et organisationnelles

- Optimiser la synergie entre les technologies : Mettre en place un système intelligent de gestion de l'énergie permettant de prioriser l'usage du solaire photovoltaïque, de l'éolien et du biogaz selon la disponibilité et les besoins horaires, tout en garantissant la continuité des services.
- Former et responsabiliser les équipes locales : organiser des sessions régulières de formation technique et de sensibilisation à la maintenance des installations pour les opérateurs et les jeunes de la localité, afin d'assurer l'autonomie et la longévité du système.
- Mettre en place un plan d'entretien préventif et curatif des installations solaires, éoliennes, de méthanisation et des équipements thermiques pour limiter les pannes.

Perspectives économiques et écotouristiques

- Développer la composante écotourisme de manière intégrée : Installer des bungalows écologiques alimentés par le mix énergétique de la ferme, équipés de chauffe-eau solaires et valorisant des matériaux locaux. Proposer des restaurants qui utilisent la cuisson solaire et le biogaz, avec des menus issus des productions de la ferme (légumes, poissons, produits transformés).
- Créer des circuits et ateliers pédagogiques autour des thèmes de l'agriculture durable, de la production d'énergies renouvelables, de la transformation artisanale et de l'agroécologie pour attirer des visiteurs scolaires, universitaires et divers touristes.
- Mettre en valeur les déchets par la transformation en compost ou la production complémentaire de biogaz, afin d'alimenter les jardins potagers dédiés aux bungalows et au restaurant.
- Exploiter l'excédent d'énergie pour injection sur le mini réseau rural et alimenter les fermes voisines en dégageant de substantiels gains.

- Intégrer le marché carbone pour échanger les émissions de gaz carbonique évitées contre des cash-flows.

Perspectives environnementales et sociétales

- Renforcer les pratiques agro écologiques associées à la ferme comme la rotation culturale, l'agroforesterie, l'intégration de cultures fourragères pour le bio digesteur et augmenter la productivité dans la préservation des sols et de la biodiversité.
- Favoriser l'inclusion des femmes et des jeunes dans la gestion des infrastructures énergétiques, des activités de transformation et dans l'accueil des visiteurs, pour maximiser les retombées socio-économiques locales.
- S'inscrire dans des réseaux nationaux et sous régionaux de fermes modèles et d'écotourisme rural, afin de bénéficier d'échanges techniques, d'un meilleur positionnement marketing et de possibles financements additionnels.

En somme, la diversification des revenus grâce à l'écotourisme et à la revente de surplus d'énergie confère à la ferme agricole intégrée de Djidja un modèle résilient, reproductible et pleinement aligné avec les Objectifs de Développement Durable. Il conviendra, à l'avenir, d'évaluer régulièrement l'impact environnemental et socio-économique de ce modèle afin de l'adapter et d'en faire un levier stratégique pour la transformation rurale du Bénin.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages et articles

1. Météo Bénin. (2008), Annales hydrologiques des années 2003 à 2007.
2. Journal de la Société Ouest Africaine de Chimie, (déc. 2018), Séchage solaire des céréales : cinétiques, évolutions thermo hygrométriques et énergétiques.
3. El-Sebaii A. A. & Shalaby, S. M. (2012), Solar Drying of Agricultural Products: A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 37-43.
4. Cirad, Louppe Dominique. (2014), Foyers Améliorés pour les fourneaux métalliques, Chapitre 4.3.
5. Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013), Solar Engineering of Thermal Processes (4th Ed.). Wiley.
6. Schwarzer, K, (2008), Solar Concentrator Systems for Cooking. Solar Energy Materials, 455-462.
7. Angelidaki & Batstone (2005), Anaerobic Digestion Biomethanisation I.
8. Marchaim (1992), Biogas Processes for Sustainable Development.
9. Metcalf & Eddy (2014), Wastewater Engineering.
10. Weiland (2010), Biogas Production: Current State and Perspective.
11. GTZ (2007) – Biogas Digest.
12. Cheng et al. (2014), Biogas Engineering.
13. BSP (2015), Biogas Handbook.
14. Møller et al., (2009) – J. Environ. Qual.
15. Guide IRENA, (2022), Renewable Power Generation Costs.

Sites internet

www.irena.org, Octobre 2024

www.globalsolaratlas.info, Décembre 2025

www.nrel.gouv, Février 2025

www.biogaz-energie-renouvelable.info, Février 2025

www.bilans-ges.ademe.fr, Mai 2025

ANNEXE I : CALCUL DES CONSOMMATIONS JOURNALIERES

Ordre	Contenu	Équipements	Puissance Nominale (W)	Qté	Heures de marche par Jour	Énergie brute kWh/j	Observations	Facteur d'utilisation Ku	Facteur de simultanéité Ks	Énergie nette kWh/j	Consommation de jour	Consommation de nuit
1	Production Végétale	Pompe d'irrigation	1200	1	8	9,6	Deux pompes disponibles mais une seule fonctionne à la fois.	0,75	1	7,2	7,2	0
		Outillages divers (Poste à souder, chargeur batteries, perceuse, pierre à meuler …)	1500	1	4	6	Temps de fonctionnement rapporté à la moyenne journalière.	1	1	6	6	0
		Broyeur de végétaux	2000	1	2	4	Temps de fonctionnement rapporté à la moyenne journalière.	0,8	1	3,2	3,2	0
		Total Production végétale				19,6				16,4	16,4	0
2	Élevage	Broyeur d'aliments	1500	1	2	3		0,8	1	2,4	2,4	0
		Ventilation	50	12	12	7,2		1	0,8	5,76	2,4	3,36
		Éclairage (LED)	10	30	12	3,6		1	0,7	2,52	0	2,52
		Pompe à eau (Abreuvoir)	750	1	3	2,25		1	1	2,25	2,25	0
		Total Élevage				16,05				12,93	7,05	5,88
3	Pisciculture	Pompe à Air	800	1	6	4,8	Deux pompes disponibles mais une seule fonctionne à la fois.	0,8	1	3,84	1,6	2,24
		Pompe de filtration	1000	1	5	5		0,75	1	3,75	1,56	2,19
		Total Pisciculture				9,8				7,59	3,16	4,43

4	Transformation Artisanale	Moulin à céréales	3000	1	8	24		0,8	1	19,2	19,2	0
		Torréfaction gari	_	Ens.	_	527,34	Utilisation de 120 kg de charbon de bois et de 11 stères de bois par mois pour les activités de transformation et cuisine du personnel.			123	123	0
		Fabrication de jus de fruits	_									
		Autres activités	_									
		Séchoir électrique	2000	1	4	8		0,8	1	6,4	6,4	0
		Réfrigérateur/Congélateur	200	2	24	9,6		1	1	9,6	4	5,6
		Total Transformation artisanale				568,94				158,2	152,60	5,6
Total charges brutes existantes						614,39	Total charges nettes existantes			195,12	179,21	15,91
5	Écotourisme (Cuisine, restaurant et buanderie)	Prises dédiées	1200	2	6	14,4		0,5	0,5	3,6	1,5	2,1
		Éclairage (LED)	200	1	12	2,4		1	0,5	1,2	0,5	0,7
		Réfrigérateur (Cuisine)	150	2	24	7,2		1	1	7,2	3	4,2
		Cuisine	_	_	_	16,46	_3 bouteilles de 13 kg de butane par mois, soit 39 kg			16,46	12,35	4,11
		Congélateur	350	2	24	16,8		1	1	16,8	7	9,8
		Machine à laver 8 kg	1200	1	2	2,4		1	1	2,4	2,4	0
		Ventilateurs	50	6	12	3,6		1	0,5	1,8	0,75	1,05
		Total Cuisine, rest. & buanderie				63,26				49,46	27,5	21,96
6	Écotourisme (hébergement)	Prises Électriques (TV, décodeurs, smartphones, Woofers)	150	12	12	21,6	Fonctionnement non simultané. Deux circuits de prises.	0,6	0,6	7,78	5,83	1,94
		Éclairage (LED)	70	6	12	5,04	Fonctionnement non simultané.	1	0,6	3,02	1,26	1,76
		Ventilateurs	50	4	12	2,4	Temps de fonctionnement rapporté à la moyenne journalière.	1	0,5	1,2	0,50	0,70

							Fonctionnement non simultané.					
		Climatiseurs	800	2	12	19,2		0,8	0,5	7,68	5,76	1,92
		Chauffe-eau électrique	1000	6	2	12	Fonctionnement non simultané.	1	0,33	3,96	0	3,96
		Total hébergement				60,24				23,64	13,35	10,29
7	Bureau & Adminis. (Accueil, salles de sports, dépendances diverses)	Prises Électriques (TV, Ordinateurs, décodeurs, smartphones, Woofers)	200	12	12	28,8	Fonctionnement non simultané.	0,6	0,8	13,824	13,82	0
		Éclairage (LED)	10	36	6	2,16	Fonctionnement non simultané.	1	0,6	1,30	1,30	0
		Surpresseur électrique	750	1	4	3		1	1	3	3	0
		Total Bureau & Administration				33,96				18,12	18,12	0
8	Éclairage Ext.	Projecteurs solaires	50	22	12	0	Kits indépendants	_	_	_		
Total nouvelles charges brutes						157,5	Total nouvelles charges nettes			91	58,97	32,25
BESOINS GLOBAUX BRUTS						771,9	BESOINS NETS			286	238	48

ANNEXE II : CHARGES ALIMENTEES PAR LE SOLAIRE PV

Ordre	Contenu	Équipements	Puissance Nominale (W)	Qté	Énergie brute kWh/j	Énergie nette kWh/j	Consommation de jour	Consommation de nuit	Source d'énergie renouvelable retenue
1	Production Végétale	Pompe d'irrigation	1200	1	9,6	7,2	7,2	0	Solaire PV
		Total Production végétale			9,6	7,2	7,2	0	
	Élevage	Ventilation	50	12	7,2	5,76	2,4	3,36	Solaire PV
		Éclairage (LED)	10	30	3,6	2,52	0	2,52	Solaire PV
		Pompe à eau (Abreuvoir)	750	1	2,25	2,25	2,25	0	Solaire PV
		Total Élevage			13,05	10,53	4,65	5,88	
3	Pisciculture	Pompe à Air	800	1	4,8	3,84	1,6	2,24	Solaire PV
		Pompe de filtration	1000	1	5	3,75	1,56	2,19	Solaire PV
		Total Pisciculture			9,8	7,59	3,16	4,43	
	Transf. Artisanale	Réfrigérateur/Congélateur	200	2	9,6	9,6	4	5,6	Solaire PV
		Total Transformation artisanale			9,6	9,6	4,00	5,6	
Total charges brutes existantes					42,05	34,92	19,01	15,91	
5	Écotourisme (Cuisine, restaurant et buanderie)	Prises dédiées	1200	2	14,4	3,6	1,5	2,1	Solaire PV
		Éclairage (LED)	200	1	2,4	1,2	0,5	0,7	Solaire PV
		Réfrigérateur (Cuisine)	150	2	7,2	7,2	3	4,2	Solaire PV
		Congélateur	350	2	16,8	16,8	7	9,8	Solaire PV
		Machine à laver 8 kg	1200	1	2,4	2,4	2,4	0	Solaire PV

		Ventilateurs	50	6	3,6	1,8	0,75	1,05	Solaire PV
		Total Cuisine, rest. & buanderie			46,8	33	15,15	17,85	
6	Écotourisme (hébergement)	Prises Électriques (TV, décodeurs, smartphones, Woofers)	150	12	21,6	7,78	5,83	1,94	Solaire PV
		Éclairage (LED)	70	6	5,04	3,02	1,26	1,76	Solaire PV
		Ventilateurs	50	4	2,4	1,2	0,50	0,70	Solaire PV
		Climatiseurs	800	2	19,2	7,68	5,76	1,92	Solaire PV
		Total hébergement			48,24	19,68	13,35	6,328	
7	Bureau & Admin. (Accueil, salles de sports, dépendances divergeo)	Prises Électriques (TV, Ordinateurs, décodeurs, smartphones, Woofers)	200	12	28,8	13,824	13,82	0	Solaire PV
		Éclairage (LED)	10	36	2,16	1,30	1,30	0	Solaire PV
		Surpresseur électrique	750	1	3	3	3	0	Solaire PV
		Total Bureau & Administration			33,96	18,12	18,12	0	
8	Éclairage Ext.	Projecteurs solaires	50	22	0	_			
Total nouvelles charges brutes					129	71	46,62	24,38	
BESOINS GLOBAUX BRUTS					171,1	106	66	40	

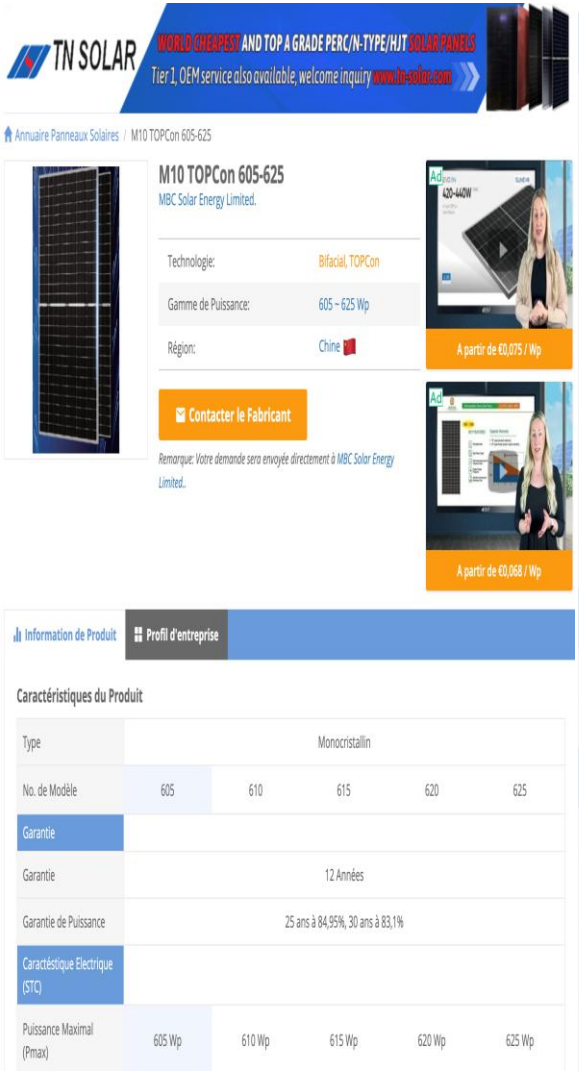
ANNEXE III : TABLEAU DE COMPARAISON DES BATTERIES

N°	Type de batterie	Avantages	Limites	Utilisation	Observations
1	Batteries au Plomb-Ouvert (Acide-Plomb)	Coût faible, Technologie mature, Recyclage bien maîtrisé	Durée de vie limitée (3-7 ans), Entretien requis (niveau d'électrolyte), Faible densité énergétique.	Systèmes solaires hors-réseau à petit budget	Faible coût d'investissement, Maintenance maîtrisée.
2	Batteries AGM/Gel (Plomb scellé)	Sans entretien, Résistance aux vibrations, Meilleure durée de vie que les batteries ouvertes	Coût plus élevé que les batteries au plomb ouvert, Sensibilité aux surcharges	Installations solaires résidentielles et mobiles (camping-cars, bateaux)	Coût inférieur à celui du Li-ion
3	Batteries Lithium-Ion (Li-ion)	Haute densité énergétique, Longue durée de vie (5-15 ans), Rendement élevé (≥95%), Faible encombrement.	Coût initial élevé, Gestion thermique nécessaire (risque d'emballement thermique).	Stockage résidentiel, Systèmes commerciaux Systèmes industriels	Les types courants sont le LFP (Sécurité accrue, stabilité thermique, durée de vie prolongée) et le NMC (Haute densité énergétique, usage en systèmes domestiques et industriels.)
4	Batteries à Flux (Redox Flow)	Durée de vie très longue (>20 ans), Capacité modulable, Pas de dégradation en profondeur de décharge.	Faible densité énergétique, Coût élevé, Complexité du système.	Projets à grande échelle (réseaux électriques, centrales solaires).	Peu approprié au mini réseau photovoltaïque
5	Batteries Sodium-Ion (Na-ion)	Matériaux abondants (pas de lithium ni cobalt),	Technologie émergente, Densité	Développement en cours pour le	

		Coût potentiellement plus bas, Bonne stabilité thermique.	énergétique inférieure au Li-ion	stockage stationnaire	
6	Batterie solide	Sécurité améliorée, Haute densité énergétique	Encore en RD		Technologies Émergentes
	Super condensateurs	Charge ultra-rapide	Décharge rapide Faible capacité	Complément aux batteries	

Source : Fiche Technique des batteries de Victron Energy

ANNEXE IV : FICHE TECHNIQUE DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES



TN SOLAR

WORLD CHEAPEST AND TOP A GRADE PERC/N-TYPE/HJT SOLAR PANELS

Tier 1, OEM service also available, welcome inquiry www.tn-solar.com

Annuaire Panneaux Solaires / M10 TOPCon 605-625

M10 TOPCon 605-625

MBC Solar Energy Limited.

Technologie:	Bifacial, TOPCon
Gamme de Puissance:	605 ~ 625 Wp
Région:	Chine

Contacter le Fabricant

Remarque: Votre demande sera envoyée directement à MBC Solar Energy Limited..

A partir de €0,075 / Wp

A partir de €0,068 / Wp

Information de Produit | Profil d'entreprise

Caractéristiques du Produit

Type	Monocristallin				
No. de Modèle	605	610	615	620	625
Garantie					
Garantie	12 Années				
Garantie de Puissance	25 ans à 84,95%, 30 ans à 83,1%				
Caractéstique Electrique (STC)					
Puissance Maximal (Pmax)	605 Wp	610 Wp	615 Wp	620 Wp	625 Wp
Tension à Puissance Maximal (Vmax)	45,8 V	45,9 V	46,1 V	46,2 V	46,3 V
Courant à Puissance Maximum (Cmax)	13,22 A	13,29 A	13,35 A	13,42 A	13,5 A
Tension Circuit Ouvert (Voc)	54,8 V	54,9 V	55,1 V	55,2 V	55,3 V
Courant Circuit Court (Isc)	13,97 A	14,04 A	14,01 A	14,17 A	14,25 A
Efficacité Module	21,64 %	21,82 %	22 %	22,18 %	22,36 %
Tolérance de Puissance (+)	+ 0,5 %	+ 0,5 %	+ 0,5 %	+ 0,5 %	+ 0,5 %
	Conditions de Test Standard (STC): masse d'air AM 1,5, irradiation 1000W/m², température des cellules 25°C				
Caractéristique Electrique en NOCT					
Température	42±2 °C				
	Température Nominale des Cellules (NOTC): 800W/m², AM 1,5, vitesse du vent 1m/s, température ambiante 20°C				
Caractéristique de Température					
Gamme de Température	-40~85 °C				
Coefficient Température (Pmax)	-0,3 %/°C				
Coefficient Température (Voc)	-0,25 %/°C				
Coefficient Température (Isc)	0,045 %/°C				

Caractéristiques Maximum	
Tension Maximale du Système	1500 V
Caractéristiques Fusibles en Série	30 A
Caracteristiques Matériel	
Dimension Module	2464x1134x30 mm
Poids	33,2 kg
Numéro Cellule	156
Type de Verre	Traitement Anti-Reflet
Epaisseur du Verre	2 mm
type de Trame	Black
No. de Diodes Bypass	3
Protection Boîte de Jonction	IP 68
Section de Câble	4 mm²

ANNEXE V : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE L'ONDULEUR

Technical Data

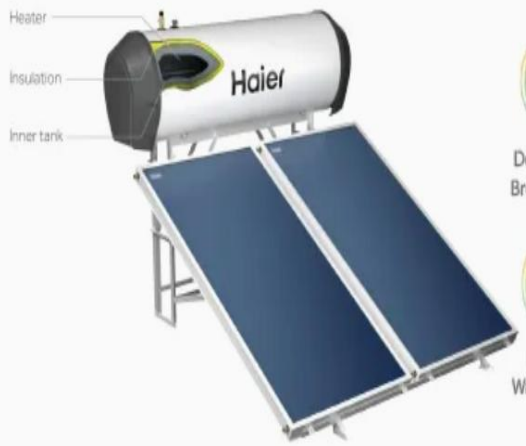
www.deyeinverter.com

Model	SUN-14K-SG05LP3 -EU-SM2	SUN-15K-SG05LP3 -EU-SM2	SUN-16K-SG05LP3 -EU-SM2	SUN-18K-SG05LP3 -EU-SM2	SUN-20K-SG05LP3 -EU-SM2
Battery Input Data					
Battery Type	Lead-acid or Lithium-ion				
Battery Voltage Range (V)	40-60				
Max. Charging Current (A)	260	280	300	330	350
Max. Discharging Current (A)	260	280	300	330	350
Charging Strategy for Li-ion Battery	Self-adaption to BMS				
Number of Battery Input	1				
PV String Input Data					
Max. PV Access Power (W)	28000	30000	32000	36000	40000
Max. PV Input Power (W)	22400	24000	25600	28800	32000
Max. PV Input Voltage (V)	800				
Start-up Voltage (V)	160				
MPPT Voltage Range (V)	160-650				
Rated PV Input Voltage (V)	550				
Max. Operating PV Input Current (A)	36+36				
Max. Input Short-Circuit Current (A)	54+54				
No. of MPP Trackers/ No. of Strings MPP Tracker	2/2+2				
AC Input/Output Data					
Rated AC Input/Output Active Power (W)	14000	15000	16000	18000	20000
Max. AC Input/Output Apparent Power (VA)	15400	16500	17600	19800	22000
Rated AC Input/Output Current (A)	21.3/20.3	22.8/21.8	24.3/23.2	27.3/26.1	30.4/29
Max. AC Input/Output Current (A)	23.4/22.4	25/24	26.7/25.6	30/28.7	33.4/31.9
Max. Continuous AC Passthrough (grid to load) (A)	70				
Peak Power (off-grid) (W)	2 times of rated power, 10s				
Power Factor Adjustment Range	0.8 leading to 0.8 lagging				
Rated Input/Output Voltage/Range (V)	220/380V, 230/400V 0.85Un-1.1Un				
Rated Input/Output Grid Frequency/Range(Hz)	50/45-55, 60/55-65				
Grid Connection Form	3L+N+PE				
Total Current Harmonic Distortion THDi	<3% (of nominal power)				
DC Injection Current	<0.5% In				
Efficiency					
Max. Efficiency	97.6%				
Euro Efficiency	97.0%				
MPPT Efficiency	>99%				
Equipment Protection					
Integrated	DC Reverse Polarity Protection, AC Output Overcurrent Protection, Thermal Protection, AC Output Overvoltage Protection, AC Output Short Circuit Protection, DC Component Monitoring, Arc Fault Circuit Interrupter (optional), Anti-islanding Protection, DC Switch, Insulation Impedance Detection, Residual Current Detection				
Surge Protection Level	TYPE II(DC), TYPE II(AC)				
Interface					
Communication Interface	RS485/RS232/CAN				
Monitor Mode	GPRS/WIFI/Bluetooth/4G/LAN(optional)				
General Data					
Operating Temperature Range (°C)	-40 to +60°C, >45°C Derating				
Permissible Ambient Humidity	0-100%				
Permissible Altitude	3000m				
Noise (dB)	<60				
Ingress Protection(IP) Rating	IP 65				
Inverter Topology	Non-Isolated				
Over Voltage Category	OVC II(DC), OVC III(AC)				
Cabinet Size (WxHxD mm)	456×750×268.5 (Excluding Connectors and Brackets)				
Weight (kg)	51.9				
Type of Cooling	Intelligent Air Cooling				
Warranty	5 Years/10 Years the Warranty Period Depends the Final Installation Site of Inverter, More Info Please Refer to Warranty Policy				
Grid Regulation	IEC 61727, IEC 62116, CEI 0-21, EN 50549, NRS 097, RD 140, UNE 217002, OVE-Richtlinie R25, G99, VDE-AR-N 4105				
Safety / EMC Standard	IEC/EN 61000-6-1/2/3/4, IEC/EN 62109-1, IEC/EN 62109-2				

Deye **Ningbo Deye Inverter Technology Co., Ltd.**
Address: No. 26 South YongJiang Road, Daqi, Beilun, NingBo, Zhejiang, China. | Tel: +86 (0)574 86228841 | E-mail: market@deye.com.cn

ANNEXE VI : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DU CAPTEUR HELIO THERMIQUE

Technical parameters



Product	Model	TP180REF	TP300REF
System	Tank Size(L)	180	300
	System Type	Direct, Thermosiphon	Direct, Thermosiphon
	Installation Type	For Flat Roof	For Flat Roof
Tank	Tank Dimensions(mm)	Φ600*1156	Φ600*1776
	Inner Tank Material	Steel with Enamel	2.5mm Steel with Enamel
	Inner Tank Dia.(mm)	Φ500	Φ500
	Outer Tank Dia.(mm)	Φ600	Φ600
	End Cap Color	Black	Black
	Insulation Thickness(mm)	50	50
	Backup Power(V/kW)	230/1.6	230/1.6
	Maxium Pressure(MPa)	0.85	0.85
	Packing Dimensions(mm)	700*700*1320	700*700*1940
Collector	Fluid Capacity(L)	1.5	3
	Riser and Heade Material	Copper	Copper
	Header Diameter(mm)	22	22
	Absorber Plate Coating Type	Blue Membrane	Blue Membrane
	Absorber Performance	α=95%±2%	α=95%±2%
	Emission Performance	e=5%±2%	e=5%±2%
	Glazing Type	Tempered Low Iron Glass	Tempered Low Iron Glass
	Glazing Transmittance	0.91	0.91
	Insulation Type	Polyester Cotton	Polyester Cotton
Frame	Frame Material	Galvanized Steel	Galvanized Steel
Accessaries	Circulating Pipe	Copper Pipe or Corrugated Pipe	Copper Pipe or Corrugated Pipe
	Load qty.40HQ	57	39

ANNEXE VII : CHARGES A ALIMENTER PAR L'EOLIENNE

N°	Contenu	Équipements	Puissance Nominale (W)	Qté	Heures de marche par Jour	Énergie nette kWh/j	Source retenue
1	PRODUCTION VÉGÉTALE	Tracteurs et Outillages agricoles motorisés	1500	1	4	6	Éolienne
		Broyeur de végétaux	2000	1	2	3,2	Éolienne
		Total Production végétale				9,2	
2	ÉLEVAGE	Broyeur d'aliments	1500	1	2	2,4	Éolienne
		Total Élevage				2,4	
4	TRANSFORMAT-ION ARTISANALE	Moulin à céréales	3000	1	4	9,6	Éolienne
		Total transformation Artisanale				9,6	
Total charges nettes existantes						21,2	
Total nouvelles charges						0	
Total charges nettes						21,2	

Source : Autoproduction

ANNEXE VIII : TABLEAU COMPARATIF DES EOLIENNES

Ordre	Type d'éolienne	Axe horizontal (HAWT)	Axe vertical (VAWT)
1	**Principe de Fonctionnement**	Fonctionne comme une hélice, face au vent. Nécessite un mécanisme d'orientation (yaw control). Plus efficace en termes de conversion énergétique (Betz, 1926).	Rotation des pâles autour d'un axe vertical, indépendamment de la direction du vent. Deux types principaux : Darrieus (lift-based) et Savonius (drag-based)** (Islam et al., 2008).
2	**Caractéristique**	Rotor monté horizontalement, perpendiculaire au vent. Généralement plus grandes et plus efficaces pour la production d'électricité à grande échelle Nécessite un système d'orientation (pivot) pour faire face au vent	Rotor monté verticalement, indépendant de la direction du vent. Pas besoin de système d'orientation. Souvent utilisées en milieu urbain ou pour de petites installations
3	**Avantages**	Meilleur rendement (Betz, 1926 ; Burton et al., 2011) Efficacité élevée (40-50%) grâce à une meilleure capture du vent. Technologie mature, largement utilisée dans les parcs éoliens. Puissance élevée, adaptée aux grandes installations (1 MW et plus).	Efficacité (Cp max: 15-35 %) Fonctionne avec des vents variables, Mertens 2006 (pas besoin de s'orienter). Silencieuses et compactes adaptées aux zones urbaines. Maintenance facilitée (moteur au sol).
4	**Limites**	Nécessite un vent directionnel stable (doit s'orienter face au vent). Bruit et impact visuel plus important. Maintenance complexe (nacelle en hauteur).	Efficacité moindre (10-30%) en raison de la traînée aérodynamique. Moins adaptées aux grandes puissances. Souffrent de vibrations en cas de vents forts. .
5	**Niveau de bruit**	50-60 db suivant la taille	< 40 dB
6	**Coût d'installation à puissance identique**	Élevé (Nécessite une grue car nacelle en hauteur) Maintenance complexe car nacelle en hauteur	Modéré car composantes au sol Maintenance simplifiée (Nécessite une grue car nacelle en hauteur)
7	**Utilisation**	fermes éoliennes, zones ventées stables, production industrielle	Environnement venteux et turbulent µilieu urbain, sites isolés, complémentsolaire/éolien
8	**Observations**	Les éoliennes verticales gagnent en popularité pour les petites installations,	Les éoliennes horizontales dominent le marché de l'éolien industriel.

Source : Autoproduction

ANNEXE IX : FICHE TECHNIQUE EOLIENNE VAWT 20 KW

Model	RX-XV7000	RX-XV8000	RX-XV10k	RX-XV15K	RX-XV20K	RX-XV25K	RX-XV30K
Rated Power	7KW	8KW	10kw	15KW	20KW	25KW	30KW
Blades Length	2.1M	2.8M	2.8M	3.2M	3.6M	4.2M	5.0M
Wheel Diameter	1.85M	1.85M	1.85M	2.0M	2.4M	2.4M	3.0M
Rated Voltage	48V~220V	48V~220V	48V~380V	48V~380V	96V~380V	96V~380V	96V~380V
Start Up Speed	1.5m/s						
Rated Speed	11m/s						
Cut-in Speed	3.5m/s						
Survival Speed	40m/s						
Blades Quantity	3 PCS Include One boost drum	3 PCS Include One boost drum	3 PCS Include One boost drum	3 PCS Include One boost drum	3 pcs Include double boost drum	3 pcs Include double boost drum	3 pcs Include double boost drum
Blades Material	Fiber glass						
Generator Type	Maglev coreless generator	Iron-core generator	Maglev coreless generator	Maglev coreless generator	Maglev coreless generator	Maglev coreless generator	Maglev coreless generator
Working Temperature	-40°C~+40°C						
Protection Level	IP54						
Working environment humidness	≤90%						
Altitude	≤4500m						
Install Height	3~12m						
Overload Protection	Electromagnetic Brake						
Gross Weight	165kg	230kg	260kg	273kg	365kg	400kg	600kg
Real Photos							

ANNEXE X : DEVIS D'IMPLANTATION DU SYSTEME SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Ordre	Composants	Unité	Quantité	Prix unitaire	Total (USD)	Fournisseurs
1	Panneaux bifacial Topcon Sun Plus series TW-605-HD-1 605Wc (Garantie 15 ans)	U	48	46,1	2212,8	Techwise Solar technology Co, Ltd
2	Onduleur hybride DEYE SUN-14k-SG05LP3-EU-SM2 3P_N_T (Garantie 5 ans)	U	1	1960	1960	Henan Livefun Solar Tech Co. Ltd
3	Batteries 12V 250Ah, LiFePO4 (Garantie 8-10 ans)	U	24	410	9840	CSPOWER BATTERY TECH CO, LTD
4	Câble 3*1,5 mm2	ml	200	0,5	100	
5	Câble 3*2,5 mm2	ml	150	0,6	90	
6	Câble 3*10 mm2	ml	60	1	60	
7	Coffret électrique de raccordement et de protection équipé : 6 disjoncteurs de tête 25 A ; 24 disjoncteurs divisionnaires 5A (Éclairage, ventilation, réfrigérateur, Pompe) ; 06 disjoncteurs divisionnaires 10A (Climatiseurs …) ; 6 départs 16 A (Prises et prises dédiées) ; 1 parafoudre Type 2 ; 1 Jeu de 48 borniers.	Ens.	1	350	350	
8	Climatiseur split 12 000 BTU/h	U	1	440	440	Anhui Solarasia Energy Technology Co. Ltd
9	Total 1 Import		1		15532,8	

10	Fret maritime, Douane et taxes et autres frais	Ens.	1	1430	1430	
11	Transport sur site	Ens.	1	250	250	
12	Nivellement, Terrassement et Génie civil	Ens.	1	450	450	
13	Confection des supports et soudure	Ens.	1	1200	1200	
14	Main d'œuvre Travaux installations-tests-Formation	Ens.	1	1100	1100	
15	Total TTC				19732,8	
16	Marge pour imprévus (5 %)		1	986,64	986,64	
17	Budget Investissement Photovoltaïque				20719,4	

ANNEXE XI : DEVIS D'IMPLANTATION DETAILLE DU SYSTEME EOLIEN

Ordre	Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire	Total (USD)	Fournisseurs
1	Éolienne VAWT 20 kW avec mât de 35 mètres, contrôleur éolien et dump load fonction.	U	1	11000	11 650	R&X Energy
2	Coffret électrique de raccordement (Disjoncteurs triphasés, monophasés et parafoudre)	U	1	450		
3	Câbles et accessoires de raccordement	Ens.	1	200		
4	Total 1 Import		1	11 650	11 650	
5	Fret maritime	Ens.	1	1 050	1050	
6	Douane, taxes et autres frais	Ens.	1	200	200	
7	Transport sur site	Ens.	1	100	100	
8	Nivellement, Terrassement et Génie civil	Ens.	1	1 400	1 400	
9	Main d'œuvre Travaux installations-tests-Formation	Ens.	1	1 350	1 350	
10	Total TTC				15 750	
11	Marge pour imprévus		1	787,5	787,5	
12	Budget Investissement Éolien				16 537,5	

Source : www.madeinchina.com

ANNEXE XII : DEVIS D'IMPLANTATION DETAILLE DU SYSTEME DE METHANISATION

Ordre	Désignation	Unité	Quantité	PU (USD)	Total	Fournisseur
1	Gazomètre PEHD (1 m³)	U	1	200	200	
2	Réseau PVC (150 m) + accessoires	Ens.	1	45	45	
3	Sécurité (détecteurs, extincteurs)	Ens.	1	180	180	
5	Filtres et Pièges à eau	U	4	20	80	
6	Compteurs à gaz	U	2	130	260	
7	Total Import Net			_	765	
8	Fret Maritime	Ens.	1	100	100	
9	Douane & taxes	Ens.	1	120	120	
10	Transport sur site	U	1	50	50	
11	Total Import Brut				1035	
12	Construction du digesteur en Béton	Ens.	1	2000	2000	
13	Construction du bac de mélange 3 m³	U	1	200	200	
14	Main d'œuvre des travaux d'Installation- Formation	U	1	300	300	
15	Total TTC				3535	
16	Marge pour imprévus				177	
17	Budget Investissement Méthanisation				3712	

Source : www.madeinchina.com; projet Songhaï Porto-Novo, Bénin.

ANNEXE XIII : TABLEAU DES PRIX DETAILLES DU SYSTEME SOLAIRE THERMIQUE

Ordre	Désignation	Unité	Qté	PU (USD)	Total	Fournisseur
1	Séchoir solaire double vitrage de 4 m2 de réflecteur vitré et de 6,5 m^3 de volume avec ventilateur 12V alimenté par PV 100W	U	2	400	800	Production locale
2	Capteur plan solaire de 4 m^2 de réflecteur double vitrage et 300 litres d'ECS livré in situ	Ens.	1	800	800	Yangzhou Xilai Solar technology Co, Ltd.
3	Four solaire de surface 2 m^2 de vitrage double avec réflecteurs en aluminium poli	Ens.	8	115	920	Production locale
5	Cuiseurs solaires à concentration avec réflecteur en aluminium poli parabolique de 3,24 m^2 et 10 kg de chambre de cuisson, support rotatif	U	8	170	1360	Production locale
6	Réflecteurs rectangulaires pour cuiseurs solaires en aluminium miroir de 3,24 m^2	U	12	120	1440	APS Eco-tech Co., Ltd
7	Réflecteurs parabolique aluminium miroir pour four solaire 3,24 m^2	U	8	135	1080	APS Eco-tech Co., Ltd
8	Transport sur site	Ens.	1	110	110	
9	Main d'œuvre des travaux d'Installation- Montage et Formation	U	1	850	850	
10	Total TTC				7360	
11	Marge pour Imprévus				368	
12	Budget Investissement Méthanisation				7728	

ANNEXE XIV : TABLEAU DE CALCUL DU LCOE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

- CAPEX : 20 396 USD
- OPEX annuel standard : 306 USD
- OPEX majoré (années 5,10,15,20,25) : 2 806 USD
- Production annuelle d'énergie : 54 764 kWh
- Taux d'actualisation : 10%
- Durée du projet : 25 ans

Année	OPEX	Facteur d'actualisation	OPEX actualisé	Production annuelle d'Énergie	Production d'énergie actualisée
1	306	0,9091	278,18	41073,45	37339,50
2	306	0,8264	252,89	41073,45	33945,00
3	306	0,7513	229,90	41073,45	30859,09
4	306	0,6830	209,00	41073,45	28053,72
5	2806	0,6209	1742,31	41073,45	25503,38
6	306	0,5645	172,73	41073,45	23184,89
7	306	0,5132	157,03	41073,45	21077,17
8	306	0,4665	142,75	41073,45	19161,07
9	306	0,4241	129,77	41073,45	17419,15
10	2806	0,3855	1081,83	41073,45	15835,59
11	306	0,3505	107,25	41073,45	14395,99
12	306	0,3186	97,50	41073,45	13087,27
13	306	0,2897	88,64	41073,45	11897,52
14	306	0,2633	80,58	41073,45	10815,92
15	2806	0,2394	671,73	41073,45	9832,66
16	306	0,2176	66,59	41073,45	8938,78
17	306	0,1978	60,54	41073,45	8126,16
18	306	0,1799	55,04	41073,45	7387,42
19	306	0,1635	50,03	41073,45	6715,84

20	2806	0,1486	417,09	41073,45	6105,31
21	306	0,1351	41,35	41073,45	5550,28
22	306	0,1228	37,59	41073,45	5045,71
23	306	0,1117	34,17	41073,45	4587,01
24	306	0,1015	31,07	41073,45	4170,01
25	2806	0,0923	258,98	41073,45	3790,92
Cumul			**6494,56**		**372825,35**

LCOE = (CAPEX + Total OPEX actualisé) / Total énergie actualisée

= (20396 USD + 6494,56 USD) / 372 825,35 kWh

LCOE = 0.07213 USD/kWh

ANNEXE XV : TABLEAU DE CALCUL DU LCOE EOLIEN

- CAPEX : 16 538 USD
- OPEX annuel : 497 USD
- Production annuelle d'énergie : 28 032 kWh
- Taux d'actualisation : 10%
- Durée du projet : 20 ans

Année	OPEX	Facteur d'actualisation	OPEX actualisé	Production annuelle d'Énergie	Production d'énergie actualisée
1	497	0.909091	451,82	28032	25483.64
2	497	0.826446	410,74	28032	23166.94
3	497	0.751315	373,40	28032	21060.86
4	497	0.683013	339,46	28032	19146.23
5	497	0.620921	308,60	28032	17405.67
6	497	0.564474	280,54	28032	15823.33
7	497	0.513158	255,04	28032	14384.85
8	497	0.466507	231,85	28032	13077.13
9	497	0.424098	210,78	28032	11888.30
10	497	0.385543	191,62	28032	10807.55
11	497	0.350494	174,20	28032	9825.04
12	497	0.318631	158,36	28032	8931.86
13	497	0.289664	143,96	28032	8119.87
14	497	0.263331	130,88	28032	7381.70
15	497	0.239392	118.98	28032	6710.64
16	497	0.217629	108.16	28032	6100.58
17	497	0.197845	98.33	28032	5545.98
18	497	0.179859	89,39.	28032	5041.80
19	497	0.163508	81.26	28032	4583.46
20	497	0.148644	73,88	28032	4166.78
Cumul		-	4231,24	-	238 652,22

LCOE = (CAPEX + Total OPEX actualisé) / Total énergie actualisée

= (16 538 USD + 4 231,24) / 238 652, 22 kWh

LCOE = 0.0870 USD/kWh

ANNEXE XVI : QUESTIONNAIRE D'ENQUETE AUPRES DES DIVERSES PARTIES PRENANTES AU PROJET

Questionnaire d'enquête A auprès des diverses parties prenantes

(Mémoire de Master : Autonomisation énergétique d'une ferme agricole intégrée à Djidja, Bénin)

Contexte : Cette enquête est réalisée dans le cadre de mémoire de Master, intitulé « Autonomisation énergétique d'une ferme agricole, intégrée à Djidja, Bénin ». Elle vise à mieux comprendre les pratiques agricoles et les besoins énergétiques et à évaluer l'intérêt des acteurs pour les solutions à proposer.

Population Cible : Différents acteurs du secteur agricole

Date : Février 2025

🔶 1. INFORMATIONS GÉNÉRALES

1. Nom / Prénom (facultatif) : _____

2. Sexe : ☐ Homme ☐ Femme

3. Âge : _____ ans

4. Statut : ☐ Exploitant agricole ☐ Ouvrier agricole ☐ Structure d'encadrement ☐ Autre : _____

5. Localisation (village/quartier) : _____

6. Niveau d'instruction : ☐ Aucun ☐ Primaire ☐ Secondaire ☐ Supérieur

🔶 2. PRATIQUES AGRO-PASTORALES

1. Types d'activités : ☐ Cultures vivrières ☐ Cultures de rente ☐ Maraîchage ☐ Élevage bovin ☐ Élevage de volailles ☐ Élevage de petits ruminants ☐ Transformation ☐ Autres : _____

2. Superficie totale exploitée (en ha) : _____

3. Nombre de têtes de bétail / volailles :

- Bovins : _____ - Petits ruminants : _____ - Volailles : _____

4. Durée d'exploitation annuelle : ☐ Saisonnière ☐ Toute l'année

5. Type d'irrigation utilisée (si applicable) : ☐ Motorisée ☐ Manuelle ☐ Goutte-à-goutte ☐ Aucune

6. Moyens de conservation / transformation des produits : _____

_____

🔶 3. BESOINS ET ACCÈS À L'ÉNERGIE

1. Source(s) actuelle(s) d'énergie : ☐ SBEE ☐ Groupe électrogène ☐ Solaire ☐ Bois / charbon

☐ Autres : _____

2. Usages énergétiques :

☐ Éclairage ☐ Pompage ☐ Irrigation ☐ Transformation ☐ Conservation (froid) ☐ Cuisson

☐ Bureautique ☐ Autres : _____

3. Consommation énergétique estimée (en kWh/jour ou litres de carburant/jour) : _____

4. Coût moyen mensuel de l'énergie : _____ FCFA

5. Pannes ou insuffisances fréquentes ? ☐ Oui ☐ Non — Si oui, précisez : _____

6. Disposez-vous d'un système de secours ? ☐ Oui ☐ Non — Type : _____

🔶 4. SOLUTIONS ENVISAGÉES ET PERSPECTIVES

1. Intérêt pour l'énergie solaire / renouvelable : ☐ Oui ☐ Non

2. Types de services énergétiques souhaités : ☐ Pompage solaire ☐ Système d'éclairage ☐ Congélation / Réfrigération ☐ Bureautique ☐ Autres : _____

3. Budget maximal mensuel envisageable pour un service énergétique fiable : _____ FCFA

4. Seriez-vous intéressé(e) par une coopération avec la ferme FIS (partage d'infrastructure, mini-réseau) ?

☐ Oui ☐ Non ☐ Peut-être

5. Autres suggestions ou commentaires :

_____

_____

_____

_____

_____

ANNEXE XVII : QUESTIONNAIRE D'ENQUETE AUPRES DES EXPLOITANTS AGRICOLES DES FERMES VOISINES

Questionnaire d'enquête B auprès des exploitants agricoles voisins de la ferme FIS

(Mémoire de Master : Autonomisation énergétique d'une ferme agricole intégrée à Djidja, Bénin)

Contexte : Cette enquête est réalisée dans le cadre de mémoire de Master, intitulé « Autonomisation énergétique d'une ferme agricole, intégrée à Djidja, Bénin ». Elle vise à étudier la faisabilité d'un mini Réseau électrique sécurisé entre la ferme FIS et les exploitations agricoles voisines.

Population Cible : Exploitants agricoles voisins de la ferme FIS

Date : Février 2025

🔶 1. INFORMATIONS GÉNÉRALES

1. Nom / Prénom (facultatif) : _____

2. Sexe : ☐ Homme ☐ Femme

3. Âge : _____ ans

4. Localisation de votre ferme (quartier/ hameau) : _____

5. Distance approximative entre votre ferme et la ferme FIS : _____ mètres

6. Superficie exploitée : _____ ha

7. Type d'exploitation : ☐ Végétale ☐ Animale ☐ Transformation agroalimentaire ☐ Autre : _____

🔶 2. INTÉRÊT POUR UN MINI-RÉSEAU ENTRE FERMES

1. Seriez-vous intéressé(e) par une connexion sécurisée à un mini-réseau électrique entre votre ferme et la ferme FIS ?

☐ Oui ☐ Non ☐ Peut-être Pourquoi ? _____

2. Accepteriez-vous de participer aux frais d'installation ?

☐ Oui ☐ Non ☐ À condition que les coûts soient raisonnables

Si oui, montant maximum à investir : _____ FCFA

🔶 3. BESOINS JOURNALIERS EN ÉNERGIE

Merci d'indiquer les équipements électriques que vous utilisez ou souhaitez utiliser :

Equipment	Puissance (W)	Durée/jour (h)
Éclairage		
Pompe d'irrigation		
Congélateur / Réfrigérateur		
Moulin / Broyeur		
Ventilateur		
Autres :		

Total estimé d'énergie consommée par jour (en kWh) : _____

🔶 4. BUDGET MENSUEL POUR L'ÉNERGIE

1. Combien dépensez-vous actuellement par mois ?

☐ Moins de 100 000 FCFA ☐ 100 000 – 250 000 FCFA ☐ 250 000 – 500 000 FCFA ☐ Plus de 500 000 FCFA ☐ Autre : _____

2. Quel serait votre budget mensuel maximum pour une énergie fiable ? _____ FCFA

🔶 5. ACCEPTABILITÉ DU TARIF PROPOSÉ (0,26 USD/kWh ~ 150 FCFA/kWh)

1. Seriez-vous prêt(e) à acheter de l'énergie à ce tarif sachant que la SBEE facture la tranche 1 (20kWh-250 kWh) à ce même montant TTC ?

☐ Oui ☐ Non ☐ Oui, à condition de : _____

2. Ce coût vous semble-t-il :

☐ Raisonnable ☐ Élevé ☐ Trop faible ☐ Ne sait pas

🔶 6. OBSERVATIONS ET SUGGESTIONS

Remarques, suggestions, préoccupations :

_____

_____

_____

_____

_____