



UFR SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département de Physique

Mémoire de Master

Spécialité : Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique

SUJET

**Application du Concept Champ Photovoltaïque Curviligne et
Linéaire (CPCL) dans le domaine de l'agro-industrie : Étude et
simulation au niveau de l'agropole sud**

Préparé par :

M. Aliou BADJI

Sous la direction de

Pr Diouma KOBOR

Soutenu publiquement le : 26/12/2023, devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
NDIAYE Lat Grand	Professeur Titulaire	Président Jury	UASZ
THIAO Serigne	Maitre-Assistant	Rapporteur	UASZ
THIAME Moustapha	Maitre-Conférences	Examineur	UASZ
KOBOR Diouma	Professeur Titulaire	Directeur Mémoire	UASZ

REMERCIEMENTS

Je remercie **ALLAH** le Tout Puissant de m'avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude au Professeur **Diouma KOBOR**, mon directeur de mémoire. Merci de m'avoir fait confiance, encadré, guidé, conseillé et à mieux me structurer. Vos qualités humaines et scientifiques m'ont permis de mener ces travaux dans de bonnes conditions.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions en commençant par le Professeur **Lat Grand NDIAYE** d'avoir accepté de présider ma soutenance. Je remercie également Docteur **Sérigne THIAO** pour avoir accepté d'examiner mes travaux en tant que rapporteur et Docteur **Moustapha THIAME** d'avoir accepté de faire partie du jury en tant qu'examineur.

Je tiens également à remercier l'ensemble des chercheurs et doctorants du LCPM.

Je ne saurai oublier tous mes amis et mes camarades de promotion qui de près ou de loin ont toujours été là pour me conseiller et mention spéciale à mon collègue et binôme **Nafissatou SALL** sans qui se travailler n'aurait pas abouti.

Enfin, mes plus grands remerciements vont à ma famille particulièrement à ma chère maman et à mon papa ainsi que mes frères et unique Sœur pour leur soutien et leurs encouragements durant tout mon parcours universitaire.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
TABLE DES MATIERES	ii
Listes des annexes	v
Listes des figures	v
LISTES DES TABLEAUX	vi
SIGLES ET ABREVIATIONS	vii
RESUME	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : État de l’art sur l’installation des panneaux photovoltaïques dans le domaine de l’agro-industriel	4
INTRODUCTION	5
I État de l’art sur l’installation des panneaux photovoltaïques dans le domaine agricole	5
I.1 Centrales au sol dans le domaine agricole	5
I.2 Centrale au sol à modules bifaciaux	5
I.3 Systèmes d’Ombrières	7
I.3.1 Les Ombrières fixes	7
I.3.2 Les Ombrières mobiles	9
I.4 Les serres photovoltaïques	11
I.5 Les systèmes photovoltaïques sur des toitures de bâtiments agricoles	12
II Performance des systèmes photovoltaïques agricoles	14
CONCLUSION	17
Chapitre II : Nouvelle Conception d’un Champ Photovoltaïque : Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire (CPCL)	19
INTRODUCTION	20
I Description du concept Agro-PV CPCL	20
I.1 Principe du concept Agro-PV CPCL	20
I.2 Description technique	22
I.2.1 Le pylône	22
I.2.2 Les panneaux photovoltaïques	23
I.2.3 Conteneur de stockage d’énergie solaire	25
I.2.3.1 Cellule de batterie	25

Mémoire de Master en EnR/EE	
I.2.3.2	Module de batterie 25
I.2.3.3	Bloc d'instruments de batterie 26
I.2.3.4	PCS 500 KW..... 26
I.2.3.5	Batterie du conteneur ESS 27
I.2.3.6	La structure de livraison..... 29
I.2.3.7	Les réseaux des câbles 29
II	Description des travaux de construction du concept Agro-PV CPCL..... 30
II.1	Principe 30
II.2	Préparation du chantier 30
II.3	Pose des structures et des panneaux..... 31
II.4	Installation des réseaux de câbles 31
II.5	Installation du conteneur de stockage et de la structure de livraison 31
II.6	Essais, Mise en service et repli du chantier 31
II.7	Maintenance et Entretien du concept Agro-PV CPCL..... 32
Conclusion 32
Chapitre III : ETUDE TECHNICO-COMMERCIALE DE L'AGRO-PV CPCL : « Etude de Cas de l'AGROPOLE SUD » 37
Introduction 38
I	Contexte et choix de simulation au niveau de l'agropole Sud..... 38
II	Principe de dimensionnement centrale photovoltaïque 37
II.1	Définition du champ PV 37
II.1.1	Puissance crête du champ PV 37
II.1.2	Détermination du nombre de panneaux photovoltaïques..... 37
II.1.3	Détermination du nombre de panneaux en série ou de la puissance de l'onduleur 38
II.1.4	Détermination du nombre de panneaux en parallèle 38
II.2	Dimensionnement de l'onduleur 38
II.3	Dimensionnement du stockage 39
II.3.1	Capacité des batteries 39
II.3.2	Nombre de branche de batterie 39
II.3.3	Nombre de batteries en séries 40
II.4	Dimensionnement sections câbles et protection DC..... 40
II.4.1	Choix des sections 40
II.4.2	Choix de la section du câble 40
III	Dimensionnement du concept Agro-PV CPCL avec PVSYST 41

III.1	Présentation de logiciel de simulation PVSYST.....	42
III.1.1	Dimensionnement du concept Agro-PV CPCL avec le logiciel PVSYST.....	42
III.2	Dimensionnement manuel du concept Agro-PV CPCL et comparaison avec une centrale photovoltaïque au sol	44
III.2.1	Dimensionnement théorique du Concept Agro-PV CPCL.....	44
III.2.2	Dimensionnement théorique de la centrale au sol	45
III.3	Analyse comparative Concept Agro-PV CPCL et centrale au sol	46
III.4	Analyse de la faisabilité économique du projet	48
III.4.1	Plan de financement et bilan économique prévisionnels	48
III.4.2	Mesures financières	49
III.4.2.1	Temps de Retour (TR) et Temps de Retour Actualisé (TRA).....	49
III.4.2.2	Valeur Actuelle Nette (VAN)	50
III.4.2.3	Taux de Rentabilité Interne (TRI)	50
III.4.3	Coût du cycle de vie (CCV).....	51
III.5	Analyse des différents moyens de financement	51
III.5.1	Financement interne via l'emprunt	52
III.5.2	Tiers-financement	52
III.6	Simulation Financière du concept Agro-PV avec le logiciel Retscreen Expert.....	53
III.6.1	Présentation du logiciel Retscreen Expert	53
III.6.2	Étude financière Concept Agro-PV	53
III.6.2.1	Données climatiques Agropole Sud (Adéane)	53
III.6.2.2	Choix du système d'installation	54
III.6.2.3	Choix du modèle énergétique.....	54
III.6.2.4	Etude financière du concept Agro-PV.....	54
III.6.2.5	Analyse Émission GES et Risque	55
III.6.2.5.1	Analyse Émission GES	55
III.6.2.5.2	Analyse risque du projet.....	56
Conclusion		57
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES		58
Références bibliographiques		60

Listes des figures

Figure 1 : Centrale sol Kael Kahone Senegal - Energies.....	4
Figure 2: Centrale au sol Pâturage.....	4
Figure 3: Centrale au sol maraîchage.....	4
Figure 4: centrale à modules bifaciaux verticaux.....	7
Figure 5: Ombrières fixes à grandes cultures.....	8
Figure 6: Ombrières fixes (ou serres ouvertes).....	8
Figure 7: Protection photovoltaïque (ou Ombrières fixes ou serre solaire aquaponique).....	8
Figure 8: trackers un axe horizontal.....	10
Figure 9: trackers biaxiaux.....	11
Figure 10: Serre photovoltaïque.....	12
Figure 11: PV sur toiture agricole.....	13
Figure 12: Tracteur solaire agricole.....	14
Figure 13: Lien entre densité de production (kWh/m ²) et espacement.....	16
Figure 14: Concept Agro-PV CPCL.....	21
Figure 15 : structure du pylône.....	22
Figure 16: Structure du pylône + Panneau Photovoltaïque.....	24
Figure 17: Cellule de batterie.....	25
Figure 18: Module de batterie.....	26
Figure 19: Bloc d'instruments de batterie.....	26
Figure 20: PCS 500 KW.....	27
Figure 21: Batterie du conteneur ESS.....	27
Figure 22: Structure de livraison.....	29
Figure 23: Plan aménagement de l'agropole Sud.....	37
Figure 24: configuration du concept Agro-PV CPCL dans PVSYST.....	43
Figure 25: variante composante opérationnelle du concept Agro-PV CPCL.....	44
Figure 26: Analyse comparative Concept Agro-PV et Centrale au sol.....	47
Figure 27: classement mensuel des centrales par coûts variable de production (F/kWh).....	49
Figure 28: Schématisation du principe de tiers-financement.....	52
Figure 31 : Émission de GES du projet.....	56
Figure 32: Analyse risque concept Agro-PV.....	57

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1 : les centrales au sol dans le domaine agricole.....	5
Tableau 2 : centrales à modules bifaciaux verticaux.....	7
Tableau 3 : Systèmes d’Ombrières fixes.....	8
Tableau 4 : Systèmes d’Ombrières ouverts.....	11
Tableau 5 : Systèmes serres photovoltaïques.....	12
Tableau 6 : le système PV sur toiture agricole.....	13
Tableau 7 : système d’installation photovoltaïque sur matériel agricole.....	14
Tableau 8 : Performance des systèmes photovoltaïques agricoles	15
Tableau 9 : structure pylône	23
Tableau 10 : Données techniques panneaux photovoltaïques 360 Wc.....	24
Tableau 11 : Système de stockage d’énergie 1 MW/2,5 MWh	27
Tableau 14 : Dimensionnement théorique du concept Agro-PV CPCL.....	44
Tableau 15 : Dimensionnement théorique d’une centrale au sol.....	46
Tableau 16 : Rentabilité du Projet	55

Listes des annexes

Annexe 1 : Tableau 12 Tableau de dimensionnement de sections de câbles rigides utilisables

Annexe 2 : Tableau 13 Tableau de dimensionnement de sections de câbles rigides utilisables en CA

Annexe 3 : Figure 29 Localisation et rayonnement solaire quotidien Agropole Sud

Annexe 4 : Figure 30 Modèle énergétique Concept Agro-PV CPCL

SIGLES ET ABREVIATIONS

PV : Photovoltaïque

Agro-PV : Agriculture-Photovoltaïque

CPCL : Champ Photovoltaïque Curviligne Linéaire

kW : kilo Watt ; **kWh** : kilo Wattheure

MW : Méga Watt ; **MWh** : Méga Wattheure

HPL : Heures pleines ; **HPT** : Heures de pointe

PVsyst : Logiciel de dimensionnement solaire

CC : Courant Continu

AC : Alternatif courant

ONUDI : Organisations Nations Unies pour le Développement Industriel

BAD : Banque Africaine de Développement

BID : Banque Islamique de Développement

FVC : Fonds Vert pour le Climat

RETScreen : Logiciel de simulation financière

SENELEC : Société nationale d'électricité du Sénégal

TRI : Temps de Rentabilité Interne

LCOE : Levelised Cost of Energy

VAN : Valeur Actuelle Nette

DRCI : Délai de Récupération du Coût Investi

RESUME

Le développement du photovoltaïque (PV) dans les exploitations agricoles contribue à la transition énergétique que le Sénégal s'est engagé. Au-delà du déploiement déjà dynamique sur les toitures des bâtiments agricoles et sur les surfaces dégradées ou artificialisées, des installations PV sur terrain agricole pourraient contribuer à l'atteinte des objectifs fixés. Pour autant, un développement sur les sols agricoles pose un double enjeu de recherche d'espace et de préservation des terres agricoles. Il est ainsi important de veiller à la préservation de la qualité des sols et de prendre en compte les impacts sur les activités agricoles, qu'il s'agit des interactions directes entre ces deux productions (agricole et énergétique) mais également des conséquences potentielles économiques, sociales, territoriales et environnementales d'une telle association.

Au regard de ce contexte énergétique, notre étude porte sur le cas de l'autonomisation de l'agropole Sud en lui fournissant le maximum de puissance demandée soit 2,834 MW. Cette étude a été faite à travers deux types de concept que sont la centrale photovoltaïque au sol et le concept Agro-PV CPCL¹ à travers le logiciel PVSyst 7.3.2 pour le dimensionnement technique, SolidWorks pour la modélisation et RETScreen Expert pour l'étude financière.

Les résultats ont montré que le concept Agro-PV CPCL se distingue par un équilibre appréciable entre production énergétique et production agricole avec un rendement à l'hectare de 1,85 MW/ha contre 0,53 MW/ha pour la technique d'installation classique. Ce résultat offre ainsi de nouvelles opportunités en termes de gain de récoltes et de surplus d'énergie pour les exploitations agricoles. L'évaluation de la différence de rendement sur 40ha en termes de production d'énergie par surface occupée et du gain en surface permet de faire une économie en termes de production agricole de 1500 kg de noix de cajou par an correspondant à 30 tonnes en 20 ans d'exploitation sur 40ha.

Ce travail, nous a permis de mettre en place un nouveau concept d'évaluation et de prise de décision par analogie au rendement agricole à l'hectare, appelé Rendement Agrivoltaïque à

l'hectare noté R_{AV} (MW/ha):
$$R_{AV} = \frac{P(\text{MW ou kW})}{S(\text{ha ou m}^2)}$$

Mots clés : solaire photovoltaïque, agro-PV, autonomie énergétique, Rendement Agrivoltaïque

ABSTRACT

The development of photovoltaics (PV) on farms contributes to the energy transition that Senegal is undertaking. Beyond the already dynamic deployment on the roofs of agricultural buildings and on degraded or artificial surfaces, PV installations on agricultural land could contribute to achieving the objectives set. However, development on agricultural land poses a dual challenge of searching for space and preserving agricultural land. It is therefore important to ensure the preservation of soil quality and to take into account the impacts on agricultural activities, whether it is the direct interactions between these two productions (agricultural and energy) but also the potential economic consequences, social, territorial and environmental of such an association.

In view of this energy context, our study focuses on the case of the autonomy of the South Agropole by providing it with the maximum power requested, i.e. 2.834 MW. This study was carried out through two types of concept, namely the ground-mounted photovoltaic plant and the Agro-PV CPCL1 concept, using the PVSyst 7.3.2 software for technical sizing, SolidWorks for modeling and RETScreen Expert for the financial study.

The results showed that the Agro-PV CPCL concept is distinguished by an appreciable balance between energy production and agricultural production with a yield per hectare of 1.85 MW/ha compared to 0.53 MW/ha for the installation technique classic. This result thus offers new opportunities in terms of harvest gain and energy surplus for agricultural operations. The evaluation of the difference in yield ver 40ha in terms of energy production per occupied surface area and the gain in surface area makes it possible to make a saving in terms of agricultural production of 1500 kg of cashew nuts per year corresponding to 30 tonnes in 20 years. Exploitation.

This work allowed us to implement a new concept of evaluation and decision-making by analogy with agricultural yield per hectare, called Agrivoltaic Yield at per hectare rated RAV

$$(MW/ha): \mathbf{R}_{AV} = \frac{P(\text{MW ou kW})}{S(\text{ha ou m}^2)}$$

Keywords: solar photovoltaic, agro-PV, energy autonomy, Agrivoltaic Yiel

INTRODUCTION GENERALE

Au Sénégal, le secteur de l'agriculture concerne environ 60 % de la population active et occupe 47 % de la superficie totale du Sénégal. Il est largement dominé par des exploitations de type familial qui constituent la quasi-totalité des activités agricoles villageoises, pour la plupart tributaires des aléas climatiques (pluviométrie). A côté d'une agriculture familiale polyvalente, émerge de plus en plus au Sénégal, une agriculture moderne basée sur une logique d'investissement et de recherche de rentabilité des capitaux mis en œuvre. Ces exploitations, essentiellement présentes dans les zones irriguées à maîtrise d'eau, n'occupent que 1 % de la population active et moins de 5 % des terres agricoles du pays [1].

En termes d'opportunité au Sénégal en 2017, l'utilisation productive de l'énergie en agriculture, surtout le pompage solaire, constitue pour les entreprises solaires photovoltaïques une principale opportunité d'atteindre les clients éloignés. Bien que 90 % des habitants urbains aient accès à l'électricité, 30 % seulement des habitants ruraux sont connectés au réseau. Malgré le fait que le Sénégal soit une niche pour les entreprises solaires en Afrique de l'Ouest, de vastes régions du pays restent mal desservies, ce qui crée une opportunité pour de nouveaux acteurs du solaire photovoltaïque dans un marché stable et actif [2].

Le Sénégal a l'intention de réduire conditionnellement ses émissions de gaz à effet de serre (GES) d'au moins 23 % d'ici 2030. Les contributions déterminées par le pays au niveau national (CDN) au titre de l'Accord de Paris définissent deux objectifs principaux relatifs à la transition énergétique : faire passer la part des énergies renouvelables dans le mixte énergétique national à 40 % d'ici 2035 en augmentant la capacité en énergies renouvelables, et accroître l'utilisation du gaz naturel pour remplacer le mazout et les centrales électriques alimentées au charbon. L'atteinte de cet objectif nécessite une mobilisation de tous les secteurs économiques, et notamment du secteur agricole. Par ailleurs, la production d'énergies renouvelables par le secteur agricole pourrait directement satisfaire une partie des besoins énergétiques d'un secteur actuellement fortement dépendant des énergies fossiles. Actuellement, l'énergie consommée par le secteur agricole ne provient des énergies renouvelables que pour 4% principalement avec les pompes solaires. Ces énergies renouvelables comme le photovoltaïque dans les exploitations agricoles ont tendance à consommer beaucoup de surface qui pourrait être valorisé à d'autre fin.

Les énergies renouvelables, par leurs installations et leur maintenance, demandent de l'espace, et de la main-d'œuvre. Le secteur d'activité au Sénégal qui pourrait être un lien pour développer les énergies renouvelables est le secteur agricole. En effet, l'activité agricole se situe sur les territoires ruraux qui occupent un espace dominant. Améliorer la productivité de l'agriculture est un axe majeur de l'action économique et sociale du Sénégal, au même titre que le renforcement de la sécurité alimentaire. Cependant, le manque d'accès à des services énergétiques modernes constitue un frein au développement de l'agriculture et de la production alimentaire. La mise en place d'applications décentralisées des énergies renouvelables au sein des chaînes de valeur agricole peut contribuer à lever certaines des barrières structurelles qui freinent actuellement la croissance du secteur agricole au Sénégal [3].

L'objectif général de cette étude est de mettre en pratique le concept Nexus énergie- agriculture afin de placer l'agriculture au cœur de la transition énergétique, en trouvant de nouvelles solutions aux enjeux de demain et en développant des modèles vertueux de synergie de fonctionnement entre production agricole et production photovoltaïque tout en limitant l'un des points faibles de l'utilisation du solaire photovoltaïque à savoir une grande occupation des surfaces utiles et cultivables.

Ce mémoire est divisé en trois Chapitres. Tout d'abord, dans le premier chapitre, nous décrirons l'état de l'art sur l'installation des panneaux solaires photovoltaïques dans le domaine agro-industriel, nous nous intéresserons à un cadre théorique et pratique pertinent, à des questions de recherches directrices, et à une méthodologie pertinente.

Ensuite, dans le deuxième chapitre, nous proposerons un nouveau concept d'une ferme agricole autonome et efficiente en énergie avec un faible impact surfacique « Agro-PV ». Ce chapitre contiendra une définition et une description des champs d'applications possibles. Nous nous intéresserons aux différents paramètres PV qui sont importants dans un système APV.

Dans le troisième chapitre, nous utiliserons les acquis que nous avons développés dans les parties précédentes pour présenter une étude technico-commerciale de l'Agro-PV : Cas pratique de l'Agropole Sud.

CHAPITRE 1

État de l'art sur l'installation des panneaux photovoltaïques dans le domaine de l'agro-industriel

INTRODUCTION

Améliorer la productivité de l'agriculture est un axe majeur de l'action économique et sociale, au même titre que le renforcement de la sécurité alimentaire. Cependant, le manque d'accès à des services énergétiques modernes constitue un frein au développement de l'agriculture et de la production alimentaire. Avec un taux d'électrification rurale proche de 40 %, les systèmes d'irrigation restent peu utilisés (actuellement, 20 % seulement des terres adaptées à l'irrigation sont effectivement utilisées) et on estime que les pertes après récoltes, atteignent 30 % à 40 % pour les fruits, les légumes et le lait. En effet au Sénégal, les équipements performants de stockage, de traitement, de transformation et de transport y sont insuffisants. Trois types d'installations ont été adaptées aux contraintes posées par l'activité agricole que l'on tentera de découvrir dans ce chapitre à travers une description détaillée des éléments qui le composent.

I État de l'art sur l'installation des panneaux photovoltaïques dans le domaine agricole

I.1 Centrales photovoltaïques au sol dans le domaine agricole

Les installations photovoltaïques majoritairement développées au Sénégal dans le domaine agricole sont des centrales au sol. Leurs structures sont surélevées à 15° et orientés plein sud. Parfois, les centrales au sol sont couplées à du pâturage, de l'horticulture et du maraîchage et ne gênent pas la structure et la faible élévation des modules. Ce type de production est beaucoup plus accentué sur la rentabilité de la centrale que la rentabilité agricole. Les retours d'expériences de ces systèmes sont cependant faibles et il serait nécessaire de revoir l'écart des modules, leur hauteur et leur densité...

Les projets de centrales au sol ciblent essentiellement le modèle de production d'une énergie compétitive recherchant des économies d'échelles avec l'ambition de développer des parcs de grande taille. Jusqu'à présent, ces parcs se sont majoritairement développés sur des terrains dégradés. Les entreprises du solaire photovoltaïque envisagent maintenant de développer des projets, limitent les puissances pouvant être atteintes ou l'association avec une activité agricole. Les développeurs tentent de mettre en place des projets plus « ancrés » dans les territoires en revendiquant ainsi le montage de « projets de territoires » plutôt que des projets énergétiques ou agricoles. L'accent est, par exemple, mis sur la pérennisation de l'installation d'un agriculteur ayant des difficultés à trouver du foncier répondant à ses besoins (et à des coûts acceptables), la redynamisation ou le maintien d'une chaîne de valeur agricole qui va au-delà de la simple activité agricole (outils de transformation, de restauration, etc.). Pour ce faire les développeurs se positionnent alors comme des aménageurs et médiateurs sur la durée, capables de concilier les

Mémoire de Master en EnR/EE
enjeux de chacun [4].

La figure 1 illustre une centrale photovoltaïque au sol installée au Sénégal plus précisément à Kael kahone.



Figure 1 : Centrale photovoltaïque au sol Kael Kahone Sénégal [5]

La figure 2 illustre une centrale photovoltaïque au sol à but de pâturage :



Figure 2 : Centrale photovoltaïque au sol Pâturage [6]

La figure 3 illustre une centrale photovoltaïque au sol à but de maraîchage :



Figure 3 : Centrale photovoltaïque au sol maraîchage [7]

Les centrales photovoltaïques au sol ont surtout été couplées à du pâturage ovin sur les prairies permanentes. Ce type de production agricole ne serait pas gêné par la structure et la faible élévation des modules. Ainsi les développeurs, ont pu réaliser ces systèmes sans nécessairement adapter l'installation en termes d'espacement, d'inclinaison et donc diminuer la rentabilité d'un projet photovoltaïque.

En termes **d'inconvénients**, les parcs photovoltaïques au sol sont consommateurs d'espace au sol. Pour une centrale au sol conventionnelle, l'occupation correspond à 1 à 1,5 ha pour un mégawatt crête installé. Le développement des parcs photovoltaïques au sol représente une concurrence notable vis-à-vis de l'agriculture, la sylviculture, les espaces naturels ou les espaces urbains. Plus spécifiquement, ces parcs photovoltaïques au sol consomment des espaces agricoles et sont un facteur important de la réduction des surfaces dont la vocation première est de produire de l'alimentation [8].

Le tableau 1 présente les caractéristiques des centrales photovoltaïques au sol dans le domaine agricole.

Tableau 1 : Caractéristiques des centrales photovoltaïques au sol dans le domaine agricole

Caractérisation du système PV Agricole		
Type d'installation	Type de production	Système Pv /Production agricole
Centrale au sol	Pâturage (ex : ovin voire apiculture)	Ombrage pour animaux Microclimat tempéré pour certaines plantes
	Maraîchages/baies	Microclimat tempéré et protections pour certaines plantes
	Grandes Cultures	Microclimat tempéré et protections plantes
	Horticulture	Microclimat tempéré et protections pour certaines plantes

I.2 Centrale photovoltaïque au sol à modules bifaciaux

Les centrales à modules bifaciaux verticaux sont quant à elles, de nouvelles structures. Elles ont été développées spécifiquement pour répondre aux enjeux agricoles liés à l'emprise des modules au sol. Les centrales à modules bifaciaux sont des centrales photovoltaïques pouvant capter les rayons du soleil sur les deux faces du panneau. Les panneaux photovoltaïques monocristallins ou polycristallins sont composés d'une plaque opaque en fond, alors qu'un module bifacial va avoir un verre transparent à l'avant et à l'arrière. L'avant du panneau photovoltaïque va capter les rayons du soleil directs et l'arrière du panneau bifacial va capter les rayons du soleil indirects grâce à l'effet d'albédo, c'est-à-dire le réfléchissement de la lumière du soleil sur le sol ou les murs et autres obstacles [9].

Pour pallier la consommation d'espace par des parcs photovoltaïques, les modules solaires double faces ont été installés à la verticale, avec une orientation est-ouest. Ils captent donc le soleil sur les deux faces en fonction des heures de la journée. Les modules sont conçus à l'aide de cellules bifaciales. Cette technologie est très prometteuse de par son espace important entre les rangées de panneaux photovoltaïques et de par son occupation du sol très réduite en comparaison avec d'autres systèmes.

En termes d'inconvénients, nous pouvons noter :

- ❖ La faible résistance face aux efforts de vents (les premières rangées de panneaux sont les plus sensibles et résistent très mal à la flexion et à la torsion, au-delà, le vent se trouve être ralenti)
- ❖ La hauteur ne doit pas excéder les 3 m (1 m de hauteur libre + 2 x 1 m de panneaux), cette hauteur conditionne l'espace requis entre les rangées de panneaux pour limiter l'effet d'ombrage porté. Comme nous l'avons vu plus haut, suivant l'orientation des panneaux, un espace de 7 à 15 m peut être demandé, influençant la production par unité de surface (kWh/m²) ainsi que le type de culture [10].
- ❖ Le temps de montage des structures extrêmement long, ce qui conduit à un coût d'investissement plus élevé car la part de la main d'œuvre est non négligeable dans le prix d'installation.

La figure 4 illustre une centrale photovoltaïque à modules bifaciaux verticaux.



Figure 4 : Centrale à modules bifaciaux verticaux [11]

Le tableau 2 donne les caractéristiques des centrales à modules bifaciaux verticaux.

Tableau 2 : Caractéristiques des centrales à modules bifaciaux verticaux dans le domaine agricole

Caractérisation du système PV Agricole		
Type d'installation	Type de production	Système Pv / Production agricole
Centrale à modules bifaciaux verticaux « Est-Ouest »	Pâturage (ou petit maraichage)	Ombrage animaux temporaire et protection contre le vent Microclimat tempéré pour certaines plantes

I.3.1 Les Ombrières fixes

Les Ombrières fixes sont des installations en hauteur permettant un couplage avec toutes les productions agricoles requérant des travaux culturaux, mécanisés ou non. Des systèmes couplant Ombrières fixes et cultures existent en exploitation ou en expérimentation sur tous les grands types de production agricole. Ces types d'installations agricoles sont relativement variés, certaines se rapprochent des structures de types serres photovoltaïques et peuvent d'ailleurs être appelées serres ouvertes, ou protection photovoltaïque (en pisciculture). Sur les productions aquacoles, des installations se rapprochent de la structure des centrales au sol, et sont appelées « centrale flottante aquacole ».

La figure 5 illustre une Ombrières fixe à grandes cultures.



Figure 5 : Ombrières fixes à grandes cultures [12]

La figure 6 illustre des Ombrières fixes (ou serres ouvertes).



Figure 6 : Ombrières fixes (ou serres ouvertes) [13]

La figure 7 illustre la protection photovoltaïque (ou Ombrières fixes ou serre solaire aquaponique).



Figure 7 : Protection photovoltaïque (ou Ombrières fixes ou serre solaire aquaponique) [14]

Le tableau 3 présente les caractéristiques des systèmes d’Ombrières fixes.

Tableau 3 : Caractéristiques des Systèmes d’Ombrières fixes dans le domaine agricole

Caractérisation du système PV Agricole		
Type d’installation	Type de production	Système Pv / Production agricole
Ombrières fixes	Grandes cultures (blé, pomme de terre)	Ombrages et protections pour certaines plantes
	Vignoble	Ombrages et protections pour certaines plantes
	Maraichage	Ombrages et protections pour certaines plantes
Ombrières fixes (ou serres ouvertes)	Arboriculture	Ombrages et protections pour certaines plantes
	Plantes médicinales et aromatiques	Ombrages et protections pour certaines plantes
Protection photovoltaïque (ou Ombrières fixes ou serre solaire aquaponique)	Pisciculture	Ombrages animaux

I.3.2 Les Ombrières mobiles

Les Ombrières mobiles sont des installations en hauteur comme les Ombrières fixes. Les modules

Mémoire de Master en EnR/EE
photovoltaïques peuvent cependant être orientés (généralement de manière automatisée), soit pour gérer l'ensoleillement et l'ombrage des cultures sous-jacentes, soit pour protéger les cultures des intempéries.

Comme les Ombrières fixes, elles peuvent être développées sur des cultures variées. La technologie des panneaux mobiles combine la volonté de travailler dans des zones où la maîtrise de la production agricole est facilitée, sans avoir les inconvénients des serres photovoltaïques (perte de luminosité, difficultés d'aération, ...) et de piloter au mieux les structures en fonction des besoins des plantes, des conditions météorologiques et des objectifs agricoles afin de favoriser la production agricole, rendant la production électrique parfois secondaire [15].

Les structures mobiles peuvent être de différents ordres :

- modules ou champs solaires coulissants,
- trackers un axe horizontal,
- trackers biaxiaux.

Ces structures ont des principes de fonctionnement différents mais possèdent toutefois des similitudes :

- les panneaux sont fixés sur des structures de 4 à 5 mètres de hauteur permettant aux engins agricoles de travailler dans des conditions similaires à des parcelles classiques,
- L'organisation des cultures est identique à des parcelles classiques : espacement des rangées, densité de plants à l'hectare identique,
- Des capteurs sont positionnés au niveau de la parcelle, permettant un pilotage intelligent des panneaux en fonction des besoins des plantes en eau et en ensoleillement,
- Les panneaux peuvent agir comme des écrans protecteurs pour les cultures en cas d'épisode météorologique extrême (grêle, gelée, vent violent, canicule) [16].

La mise en place de ces structures permet une utilisation des sols identique à des parcelles classiques : elles sont suffisamment hautes pour permettre le passage des engins mécaniques. Cette méthode favorise la production agricole en nécessitant un investissement conséquent au niveau de l'installation : les structures sont relativement hautes et se devant de résister aux intempéries (vents, grêle, ...). Par ailleurs, le pilotage des panneaux mobilise des technologies pointues (capteurs, pilotage à distance, ...).

En termes **d'inconvénients**, ça requiert une conception et une orientation géométrique minutieuse. La disposition des panneaux de manière à ce qu'ils ne réduisent pas excessivement la quantité de lumière solaire directe entrant dans l'ombrière est cruciale pour la productivité des cultures. Ces techniques restent encore expérimentales et le coût de l'installation reste difficile à évaluer.

La figure 8 illustre des trackers à un axe horizontal.



Figure 8 : trackers un axe horizontal [17]

La figure 9 illustre des trackers biaxiaux.



Figure 9 : trackers biaxiaux [18]

Le tableau 4 présente les caractéristiques des systèmes d’Ombrières ouverts

Tableau 4 : Caractéristiques des Systèmes d’Ombrières ouverts dans le domaine agricole

Caractérisation du système PV Agricole			
Type d’installation	Type de production	Système agricole	Pv / Production
Ombrières (surélevées)	mobiles	Tout type de cultures	Ombrage et protection pour certaines plantes

I.4 Les serres photovoltaïques

La serre est un système de production intensif utilisé aujourd’hui dans de nombreuses régions du monde pour les cultures de certains légumes, fruits, fleurs ou plantes ornementales. En les protégeant des aléas climatiques et en exploitant au maximum le rayonnement solaire naturel, la serre permet de mettre les cultures dans des conditions très favorables, d’augmenter ainsi les

Mémoire de Master en EnR/EE
rendements et d'élargir la période de production.

Les serres photovoltaïques sont des installations généralement identiques aux serres classiques, sur lesquelles des modules photovoltaïques remplacent des horticoles en toiture. Elles diffèrent donc principalement des sols classiques par l'ombrage sous-jacent. Les installations présentent des taux de couverture assez importants et un ombrage non supporté par toutes les cultures [19]. En termes **d'inconvénients**, les panneaux photovoltaïques installés sur le toit des serres et des pépinières ombrageront la surface en dessous. L'ombre produite, empêchera la lumière directe du soleil d'atteindre les plantes. Ce facteur aura très probablement un impact négatif sur leur croissance. Il est donc important de prendre en compte les différents facteurs de risque pour la santé des plantes dans ces structures avant de procéder à l'installation de systèmes photovoltaïques.

La figure 10 illustre une serre photovoltaïque.



Figure 10 : Serre photovoltaïque [20].

Le tableau 5 donne les caractéristiques d'une serre photovoltaïque.

Tableau 5 : Caractéristiques des Systèmes serres photovoltaïques dans le domaine agricole

Caractérisation du système PV Agricole		
Type d'installation	Type de production	Système Pv / Production agricole
Serre PV	Maraîchage	Microclimat et protection pour certaines plantes voire utilisation de l'énergie

I.5 Les systèmes photovoltaïques sur des toitures de bâtiments agricoles

Les systèmes photovoltaïques sur des toitures de bâtiments agricoles sont fortement développés, principalement parce que les grandes surfaces des bâtiments agricoles ont rendu pertinent l'investissement dans une installation photovoltaïque. Seules ont été retenues, dans cette étude, les couplages permettant l'autoconsommation de l'électricité pour les activités agricoles.

La toiture d'un bâtiment agricole peut constituer un emplacement idéal pour une installation

solaire. Les toitures présentent une grande superficie et comportent peu d’obstructions et le propriétaire exerce généralement un contrôle sur les objets qui pourraient faire de l’ombre sur les modules solaires pendant la durée de vie de l’installation. Cependant, la plupart des bâtiments agricoles ne sont pas conçus pour supporter de telles installations solaires. Avant d’en installer une, il faut donc tenir compte divers facteurs tels que les coefficients d’exposition au vent et les coefficients de glissements [21].

En termes **d’inconvénients**, l’agriculteur n’est pas toujours le propriétaire de ses bâtiments, ce qui rend la décision d’équipement plus complexe. La rentabilité du projet – pour l’agriculteur comme pour le tiers-investisseur – dépend fortement de certains paramètres : orientation de la toiture, prix de l’installation, accessibilité du hangar, coût des travaux de rénovation, ...

La figure 11 illustre un système d’installation photovoltaïque sur bâtiment agricole.



Figure 11 : PV sur toiture agricole [22]

Le tableau 6 présente les caractéristiques d’un système PV sur toiture agricole.

Tableau 6 : Caractéristiques du système PV sur toiture agricole

Caractérisation du système PV Agricole		
Type d’installation	Type de production	Système Pv / Production agricole
PV toiture agricole	Élevage en stabulation	Autoconsommation de l’énergie produite

Une dernière typologie de « systèmes photovoltaïques sur matériel agricole » (par exemple sur tracteurs solaires) a été identifiée bien qu’elle reste encore très spécifique et assez complexe. Ce type d’installation peut permettre l’utilisation d’électricité dans des zones non raccordées ou ne disposant pas d’électricité à proximité immédiate [22].

En termes **d’inconvénients**, un surdimensionnement du système photovoltaïque dû à la consommation énergivore des matériels surtout pour le cas des tracteurs.

La figure 12 illustre un système d’installation photovoltaïque sur matériel agricole.



Figure 12 : Tracteur solaire agricole [22]

Le tableau 7 permet de caractériser un système d’installation photovoltaïque sur matériel agricole.

Tableau 7 : système d’installation photovoltaïque sur matériel agricole

Caractérisation du système PV Agricole		
Type d’installation	Type de production	Système Pv / Production agricole
PV sur matériel agricole	Stockage et culture	Autoconsommation de l’énergie produite pour tracteur électrique

II Performance des systèmes photovoltaïques agricoles

La performance énergétique des systèmes photovoltaïques sur terre agricole est généralement inférieure ou égale aux systèmes sans activité agricole. En effet, un des objectifs de ces systèmes étant de maintenir des rendements agricoles « acceptables » ou d’intégrer le bien-être animal pour l’élevage, la transformation in situ des productions agricoles, la production d’électricité, via les modules photovoltaïques est généralement diminuée [23].

Le tableau 8 présente les principales caractéristiques de ces structures photovoltaïques spécifiques.

Plusieurs publications ont étudié les effets de la variation de la densité de modules dans les structures fixes, généralement sur la production agricole située en dessous, parfois sur l’installation photovoltaïque et sur la production électrique.

L’expérimentation de l’INRA Montpellier, support de plusieurs publications permet de mieux structurer la performance des systèmes photovoltaïques agricoles : Le tableau 8 permet de mieux cerner la performance des systèmes photovoltaïques agricoles.

Le tableau 8 illustre la performance des systèmes photovoltaïques agricoles.

Tableau 8 : Performance des systèmes photovoltaïques agricoles

Caractère	Ajustements du système photovoltaïque sur terre agricole	Conséquences sur la production d'électricité
Configuration des modules - Densité - Hauteur - Répartition	- Espacement plus important des rangés de modules PV - Nombre moindre de modules par rangée - Rehaussement des rangées/modules	MWh/ha plus faible : réduction de la puissance installée par unité de surface foncière
Modulation de l'orientation des modules PV	Modulation dynamique de l'angle d'inclinaison des modules pour maintenir un certain niveau de production agricole ou l'optimiser	kWh/kWc plus faible : réduction de la production électrique à puissance constante par effet de réduction du nombre d'heure de fonctionnement à puissance nominale
Technologies de modules PV	Utilisation de technologies permettant de laisser passer une partie du rayonnement (panneau à densité de cellules PV diminuée, module PV semi-transparent)	W/m ² de panneau plus faible : diminution des rendements de conversion énergétique

- en « full density FD » (espacement optimal des modules photovoltaïques pour la production d'électricité) avec une distance entre deux lignes successives de modules photovoltaïques et de 1,6 m ;
- et en « half density HD » avec une distance entre deux lignes successives de modules photovoltaïques de 3,2 m.

Pour l'installation en FD, la radiation lumineuse captée par les modules photovoltaïques est de 72 W/m², contre 36 W/m² en HD. Le rendement électrique de ces deux installations est de 1 et 0,52 respectivement [24].

De la même manière, des études sur des installations à haute et faible densité ont été faites ; elles sont caractérisées par 8 champs de modules espacés de 0,71 m et 4 champs de modules espacés de 1,67 m, et se traduisent respectivement par des productions électriques d'un rapport de

Enfin, Dinesh et Pearce comparent en 2016 trois structures dont les productions électriques diffèrent en fonction des densités de modules :

- « Ground mounted », 1 m au-dessus du sol, 1400 modules/hectare, espacement entre les lignes de modules photovoltaïques de 6 m,
- « Stilt mounted full density », 4 m au-dessus du sol, 2400 modules/ hectare, espacement entre les lignes de modules photovoltaïques de 3,2m,
- « Stilt mounted half density », 4 m au-dessus du sol, 1300 modules/ hectare, espacement entre les lignes de modules photovoltaïques de 6,4 m [26].

Les puissances électriques sont respectivement de 429 kW/ha, 720 kW/ha, 390 kW/ha. Ces configurations sont comparées à d'autres et à travers les distances entre les modules photovoltaïques également (voir Figure 13).

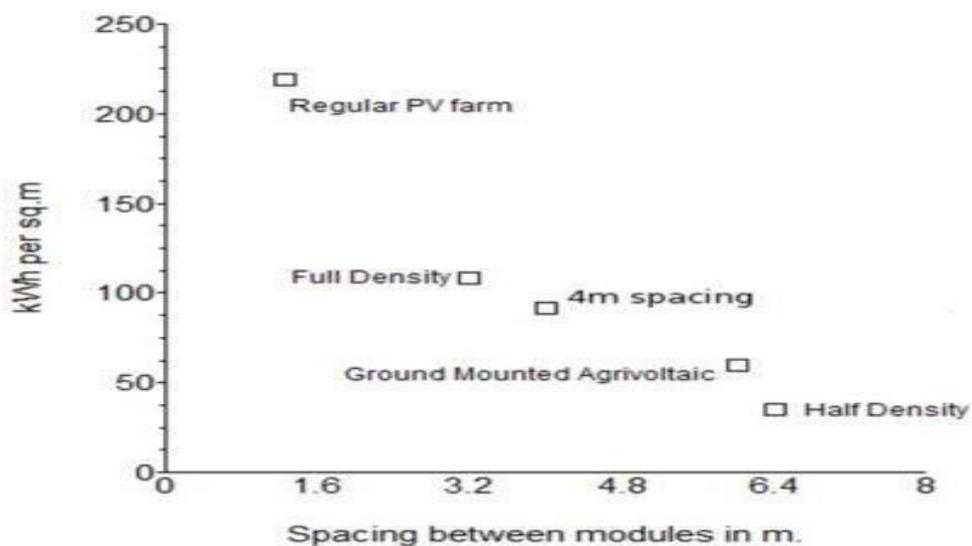


Figure 13 : Lien entre densité de production (kWh/m²) et espacement. [27]

L'option de diminution de la densité de modules photovoltaïques, sur une structure fixe, pour laisser une plus grande partie des rayonnements aux cultures sous-jacents, réduit, de fait, la production électrique et ce, même pendant les périodes sans besoins d'ensoleillement pour la

culture sous-jacente. Ces structures ne disposent donc pas de flexibilité pour optimiser la production d'électricité.

CONCLUSION

Parmi les systèmes cités ci-dessus, les centrales au sol et systèmes photovoltaïques sur des toitures de bâtiments agricoles présentent des potentiels de développement relativement forts au Sénégal. Il est à noter que ces deux systèmes, sont aussi bien applicables en mode commercial. Ce chapitre permet de voir et comprendre l'état de l'art des installations des panneaux photovoltaïques dans le domaine agricole que ce soit sur sol ou surélevées, fixes ou mobiles. Les deux activités (agricole et énergétique) dans certains contextes suppriment en intégralité l'activité agricole tandis que dans d'autres ces deux activités se partagent l'espace disponible et l'ensoleillement. Ainsi, les rendements respectifs de deux activités sont influencés par les caractéristiques de l'installation photovoltaïque : densité, types de modules, inclinaison, possibilité de pilotage, etc.

L'activité agricole est influencée par quatre grands facteurs, qui peuvent alternativement avoir des effets positifs ou négatifs sur son rendement, sa qualité et son homogénéité : le rayonnement solaire, la température, l'évapotranspiration et l'efficience de l'eau. Ainsi, la combinaison d'une production agricole avec une production photovoltaïque sera dépendante des interactions physiques ayant lieu entre chacune de ces productions et influençant directement les quatre facteurs précédemment cités. Ainsi, Il peut être proposé un nouveau concept de couplage compatible pour ces quatre facteurs, par exemple, une préservation du foncier agricole utile.

Le chapitre 2 consistera à proposer un nouveau concept d'application des panneaux solaires photovoltaïques adapté à l'agriculture africaine.

CHAPITRE 2

Nouvelle Conception d'un Champ Photovoltaïque : Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire (CPCL)

INTRODUCTION

Les parcs photovoltaïques dans le domaine de l'agro-industrie sont des installations de grande superficie qui permettent d'équiper des sites de grande production à partir de l'énergie radiative du soleil. Ces installations solaires au sol ou surélevées, fixes ou mobiles posent des questions sur la concurrence avec d'autres usages du sol, comme l'agriculture, la sylviculture, la transformation agroalimentaire ou l'urbanisation.

Après avoir mené au niveau du chapitre 1, une analyse sur les perspectives du déploiement des installations solaires dans le domaine de l'agro-industrie et de leurs incidences sur les autres affectations des sols, nous tenterons de déterminer un nouveau concept beaucoup plus adapté à l'agriculture africaine.

I Description du concept Agro-PV CPCL

I.1 Principe du concept Agro-PV CPCL

Il existe à ce jour de multiples projets en exploitation agricole occupant des espaces pouvant dépasser plusieurs dizaines d'hectares. Si ces sites étaient jusqu'alors implantés sur des surfaces à potentiel agro-industrie très faible voire inexistant, la mixité des usages se limitait à l'action de faire paître le bétail pour l'entretien des espaces sous panneaux, et à la possibilité lorsque les sols le permettaient de semer des plantes d'agaves qui permettraient de produire du biocarburant.

Par ailleurs au Sénégal, la raréfaction du foncier disponible a provoqué de fortes oppositions dans le monde de l'agro-industrie, qui voyait une partie de ses agriculteurs délaisser la culture de leur terre au profit de la réalisation de centrales au sol, des bâtiments agricoles...

Enfin, et aujourd'hui, toute nouvelle réalisation photovoltaïque, qu'elle soit fixe ou sous tracker, fait disparaître temporairement la capacité agricole de la parcelle pendant toute la durée d'exploitation agricole de la centrale solaire.

Un nouveau concept doit être mis en place où photovoltaïque et monde agricole peuvent cohabiter pour limiter la disparition du foncier agricole et assurer la performance énergétique.

Le concept Agro-PV CPCL a pour vocation de réconcilier foncier agricole et applications de systèmes photovoltaïques voire centrale solaire photovoltaïque, avec un dispositif vertueux qui mutualise les deux usages. Ce concept Agro-PV CPCL permet en outre de :

- Libérer un potentiel foncier en plaçant les panneaux solaires photovoltaïques au niveau des contours (clôtures),
- Maitriser, la gestion énergétique en utilisant des structures de pylônes comme support des panneaux photovoltaïques,
- Vendre ou louer sa clôture pour usage énergétique,
- Apporter de la sécurité aux installations.

Si de nombreuses installations photovoltaïques ont déjà été réalisées, il n'existe encore que très peu d'installations permettant une exploitation agricole standard en dessous de ces espaces dans le monde, encore moins à grande échelle (agro-industrie). Il s'agit donc ici d'un concept très novateur. Il s'agit dès lors de concevoir une structure Agro-PV CPCL répondant en premier lieu aux besoins de l'agriculteur pour l'exploitation quotidien de ses terres, et dans un second temps, aux besoins du producteur d'énergies et aux contraintes d'exploitation propre à son métier.

Ce nouveau concept Agro-PV CPCL se veut être illustrant d'une coexistence raisonnée des activités de production agricole et de production d'énergie renouvelable, où chacun partage un espace différent et où chaque activité apporte à l'autre un bénéfice du fait de sa présence.

La **figure 14** illustre le concept Agro-PV CPCL.

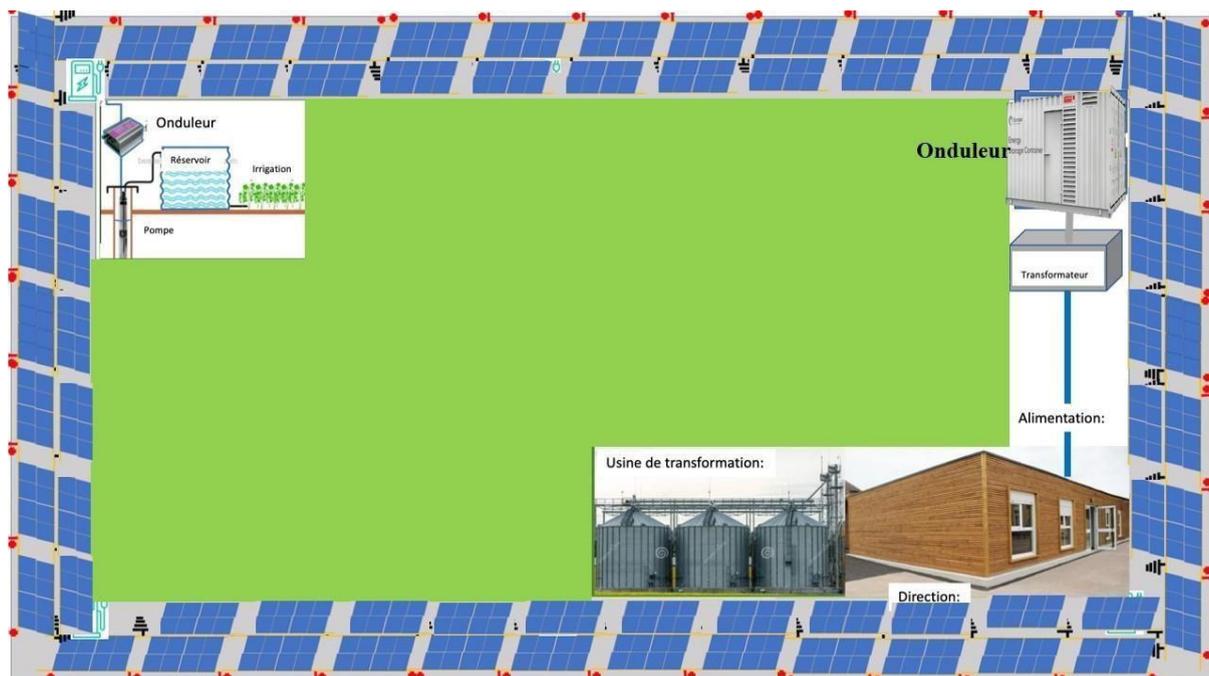


Figure 14 : Concept Agro-PV CPCL[28]

I.2 Description technique

Le concept Agro-PV CPCL consiste à placer 8 panneaux photovoltaïques au niveau d'un pylône et de les ranger tout au long de la clôture agricole. Les structures photovoltaïques utilisées pour la mutualisation avec l'activité agricole possèdent deux degrés de liberté pouvant être dynamiques : une rotation horizontale pour régler l'azimut et une rotation verticale pour l'inclinaison. La rotation horizontale permet de suivre le mouvement du soleil tout au long de la journée. La rotation verticale permet d'orienter la structure selon la déclinaison saisonnière du soleil. Le cas fixe est celui traité dans ce projet

I.2.1 Le pylône

Les supports (pylônes) comprennent 2 axes de 2,4384m longueur. Par conséquent, les panneaux solaires peuvent être élevés jusqu'à 4,572m du sol, de sorte que l'ombre des arbres ou d'autres obstacles sur le chemin n'affectera plus son efficacité. De plus, l'inclinaison des panneaux solaires peut être réglée manuellement de 10 à 35 degrés pour une performance optimale en fonction de la saison. Il est recommandé d'installer les panneaux sur le pylône, avec une base en béton, en utilisant des tiges en acier et des boulons d'ancrage pour une sécurité maximale. Ainsi, même les jours de grand vent, l'installation resterait toujours stable. Ce système de fondations par pieds présente des avantages, notamment l'absence d'impact pour le sol. De plus, ils sont entièrement réversibles et leur démontage est facile (simple arrachage). A noter que le choix de la fondation au sol sera confirmé par une étude géotechnique qui sera réalisée avant le début des travaux.

La figure 15 illustre la structure du pylône fait à travers le logiciel solidworks.



Figure 15 : structure du pylône

Le tableau 9 donne les caractéristiques de la structure du pylône.

Tableau 9 : structure pylône

Structure Pylône	
Pylône	
Matériaux	Acier/Alu
Surface	16,46 m ²
Nombre de colonnes	4
Nombre de lignes	3
Hauteur de mât	3,32 m
Poids	500 kg
Vitesse de vent max	120 km/h
Fondation	
Largeur fondation	1,25 m
Longueur fondation	1,25 m
Profondeur	1 m
Volume	1,6 m ³
Poids	3594 kg

I.2.2 Les panneaux photovoltaïques

Le photovoltaïque est une technologie permettant de convertir l'énergie solaire (photons) en énergie électrique par l'intermédiaire de cellules photovoltaïques, disposées en modules appelés panneaux photovoltaïques.

Un panneau photovoltaïque est un capteur solaire composé de plusieurs cellules photovoltaïques. C'est un générateur électrique qui recueille de la lumière et la transforme en électricité. La quantité d'électricité produite dépend de la puissance maximale du panneau, exprimée en Watt crête (Wc), de l'ensoleillement et de son rendement (la quantité d'énergie qu'il peut capter).

Dans le cadre du concept Agro-PV CPCL et dans le cadre de ce projet, le choix s'est fait sur les panneaux de 360 Wc Silicium monocristallin. Ce type de module est en effet pressenti pour la mise en œuvre de grande puissance et correspond usuellement au module disponible chez la plupart des fabricants.

Ainsi la puissance effective du concept Agro-PV CPCL est susceptible d'être modifiée en fonction de la puissance énergétique du module et aussi de la demande énergétique. Néanmoins le choix du module et de la demande ne modifiera pas les caractéristiques géométriques du concept Agro-

Le tableau 10 illustre les données techniques des panneaux choisis dans le cadre de cette étude.

Tableau 10 : Données techniques panneaux photovoltaïques 360 Wc

Type d'installation	Type de production
Dimensions Modules	1980x1002x40 mm
Poids	23 kg
Puissance nominale P_{MPP} (tolérance +/- 3%)	360 W
Tension à puissance max. V_{MPP}	38,4 V
Courant à puissance max. I_{MPP}	9,38 A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	47,4 V
Courant de court-circuit I_{cc}	10,24 A
Caractéristiques électriques selon STC (valeurs aux Conditions de test standardisées (STC) : irradiation 1000W/m ² , température des cellules 25 °C, masse d'air 1,5)	

La figure 16 illustre la structure du pylône + Panneau photovoltaïque réalisée à l'aide du logiciel solidworks.



Figure 16 : Structure du pylône + Panneau Photovoltaïque

I.2.3 Conteneur de stockage d'énergie solaire

Le conteneur solaire de stockage est une solution de stockage d'énergie complète et autonome pour le système d'énergie solaire à l'échelle commerciale et utilitaire. Les batteries et les convertisseurs, le transformateur, les commandes, les équipements de refroidissement et auxiliaires seront acquis en un seul lot compact et installés dans un local technique. L'installation du conteneur solaire de stockage sur le site du projet est simple et rapide.

Les gammes de MWh sont des tailles de conteneurs de 20, 30 et 40 pieds pour fournir une plage

Mémoire de Master en EnR/EE
de capacité énergétique de 1,0 à 3,5 MWh par conteneur afin de répondre à tous les niveaux de demande de stockage d'énergie. Cependant, un profil de charge devrait être étudié en amont afin de mieux choisir l'option et la quantité de stockage pour une autonomie totale.

Le conteneur solaire de stockage est essentiellement composé de :

I.2.3.1 Cellule de batterie

Le noyau de la batterie adopte la batterie au lithium-phosphate-LFP 48173170^E, la capacité est de 120 Ah, la tension nominale est de 3,2 V, la plage de tension de fonctionnement est de 2,5 à 3,65 V, le taux d'auto-décharge mensuel de la batterie est $\leq 3\%$.

La figure 17 illustre la cellule de batterie.



Figure 17 : Cellule de batterie [29]

I.2.3.2 Module de batterie

Le module standard de stockage d'énergie est composé de 24 cellules simples, la spécification est 2P12S, l'énergie est de 9,216 kWh, la tension nominale est de 38,4 V, la plage de tension de fonctionnement est de 33,6 à 43,2 V et la masse est d'environ 85 kg.

La figure 18 illustre le module de batterie.



Figure 18 : Module de batterie [30]

I.2.3.3 Bloc d'instruments de batterie

Le bloc de batteries se compose de 18 modules standards de stockage d'énergie avec une spécification 2P216S, une énergie de 165,888 kWh, une tension nominale de 691,2 V, une plage de tension de fonctionnement de 604,8 V à 766,8 V et une masse totale d'environ 1 700 kg.

La figure 19 illustre le bloc d'instruments de batterie.



Figure 19 : Bloc d'instruments de batterie [30]

I.2.3.4 PCS 500 KW

Inverseur de batterie bidirectionnel 500 kW, peut être utilisé seul ou avec un chargeur solaire et d'autres accessoires pour différents scénarios d'application. Mise en parallèle de plusieurs unités, configuration flexible, mode de travail programmable, prise en charge de la commande à distance de DG, écran LCD tactile.

La figure 20 illustre le PCS 500 kW



Figure 20 : PCS 500 kW [30]

I.2.3.5 Batterie du conteneur ESS

Notre système de stockage d'énergie en conteneur (BESS) est la solution idéale pour les projets de stockage d'énergie à grande échelle. Les conteneurs de stockage d'énergie peuvent être utilisés pour l'intégration de diverses technologies de stockage et à différentes fins.

La figure 21 illustre la batterie du conteneur ESS :



Figure 21 : Batterie du conteneur ESS [30]

Le tableau 11 présente les caractéristiques du Système de stockage d'énergie 1 MWh/2,5 MWh :

Système de stockage d'énergie 1 MW/2,5 MWh		
Puissance de sortie nominale		1000 kW
Capacité nominale		2500 kWh
Phases c.a.		Triphasé, quatre fils
Mode de décharge de la grille	Tension nominale	380 V.
	Plage de tension	380 ±15 % V.
	Fréquence nominale	50 Hz
	Plage de fréquence	47.5 à 51,5 Hz
	Forme d'onde de courant total	<5 %
	Taux de distorsion (THD)	
	Facteur de puissance de sortie	≥ 0.99
Mode de fonctionnement réseau isolé	Tension nominale	380 V.
	Précision de la tension	<±3 %
	Distorsion de la tension de sortie	<5 %
	Fréquence de sortie nominale	50 ±2 % Hz
	Plage de transition de tension	<10 %
	Peut supporter un déséquilibre de charge triphasé	100 %
Mode de charge connecté au réseau	Tension nominale	400 V.
	La plage de tension est autorisée	380 ±15 % V.
	Plage de fréquence	47.5 À 51,5 H
	Facteur de puissance	≥ 0.99 (valeur absolue)
Bruit		<70 dB
CLASSE IP		IP54
Communication externe		Ethernet
Dimensions		12192 mm (L) x 2438 mm (l) x 2591 mm (H)
Poids		22 T

I.2.3.6 La structure de livraison

La structure de livraison constitue l'interface entre le réseau de la SENELEC et le réseau interne du concept Agro-PV CPCL. Elle abrite notamment les moyens de protection (disjoncteurs), de comptage de l'énergie, de supervision et de contrôle du concept Agro-PV CPCL. La structure de livraison est constituée de deux bâtiments préfabriqués en béton aux normes en vigueur (C13-200 et C13-100 notamment). Le premier bâtiment comprend un poste de livraison électrique normalisé y compris les systèmes de contrôle du concept et aura une surface de 34,5 m² (11,5m x 3m) maximum. Le second comporte un filtre électrique accordé sur la fréquence du signal tarifaire (50 Hz) et il occupe une surface de 21 m² (7m x 3m) maximum.

La figure 22 permet d'illustrer la structure de livraison.



Figure 22 : Structure de livraison [30]

I.2.3.7 Les réseaux des câbles

Sur ce nouveau concept, le dimensionnement des câbles le long du champ reliant les différents blocs en série est fondamental et incontournable pour assurer une production efficace et efficiente et sécurisée.

Au niveau des pylônes seront installés les réseaux de câbles suivants :

- ✓ Les câbles électriques

Ils sont destinés à transporter l'énergie produite par les modules vers le conteneur de stockage d'énergie, puis vers la structure de livraison ;

- ✓ Les câbles de communication

Ils permettent l'échange entre les onduleurs et le système de supervision (SCADA), situé dans la structure de livraison. Une connexion internet permet également d'accéder à ces informations à distance.

- ✓ La mise à la terre

- La mise à la terre des masses métallique,
- La mise en place du régime neutre,
- L'évacuation d'éventuels impacts de foudre.

II Description des travaux de construction du concept Agro-PV

CPCL

II.1 Principe

Le chantier de construction du concept Agro-PV CPCL se déroulera en plusieurs étapes réparties sur plusieurs mois. Le nombre d'ouvrier prévu sur la durée sera établi au niveau du chapitre 3. L'ensemble du matériel sera acheminé par deux camions circulant deux fois en moyenne par jour chacun sur toute la durée du chantier. Des règles de sécurité et de protection (EPI et EPC) seront remises aux différents prestataires intervenant sur le site.

II.2 Préparation du chantier

La clôture sera la base de l'installation des pylônes ; une surface de 30 m² sera réservée pour le conteneur de stockage et une base vie de 3000 m² environ, permet d'accueillir les entrepreneurs pour la période de construction du concept Agro-PV CPCL et constituera une zone de stockage. La base vie sera composée, entre autres, des éléments suivants :

- un (des) bureau(x) de chantier ;
- un vestiaire – réfectoire
- un bloc sanitaire
- une zone de déchets

II.3 Pose des structures et des panneaux

Les fondations des pylônes seront installées selon la technique la plus adaptée à la typologie choisie pour le site suite aux études géotechniques réalisés en phase de pré-construction.

Les modules seront fixés sur les pylônes en utilisant le système préconisé par le fournisseur des modules en tenant en compte de l'inclinaison plein Sud et une orientation de 14°.

II.4 Installation des réseaux de câbles

Les câbles électriques nécessaires au transport de l'énergie vers le point de livraison du réseau de la SENELEC de même que les réseaux de communication seront installés le long des pylônes (clôture). Leurs dimensions seront éclaircies au niveau du chapitre 3. Les modules seront connectés en série entre eux afin de former une branche (ou string). Puis les strings, groupés en

Mémoire de Master en EnR/EE
parallèles dans les boîtiers de raccordement, formant ainsi un champ au niveau de plusieurs pylônes alignés.

II.5 Installation du conteneur de stockage et de la structure de livraison

Le conteneur de stockage étant déjà assemblée aura une pose beaucoup plus simple que la structure de livraison qui nécessitera une excavation de 80 cm d'épaisseur. Les deux seront installés à l'aide d'une grue de façon à enterrer 10 cm environ pour le conteneur de stockage et 60 cm pour la structure de livraison. La partie enterrée de la structure de livraison sera utilisée pour le passage des câbles des réseaux sur site à l'intérieur du poste. A la sortie du concept Agro-PV CPCL, au niveau de la structure de livraison, une liaison avec le réseau de la SENELEC sera réalisée.

II.6 Essais, Mise en service et repli du chantier

Préalablement à la mise en service, des tests de fonctionnement seront réalisés. Ils visent à s'assurer du bon fonctionnement de l'ensemble des composantes de la centrale d'un point de vue électrique et de contrôle à distance (supervision)

Si les tests sont favorables, le concept Agro-PV sera mis en service et la base vie sera alors démontée.

II.7 Maintenance et Entretien du concept Agro-PV CPCL

Un générateur photovoltaïque entraîne généralement de faibles frais de maintenance. Toutefois, afin de produire le maximum d'énergie, les modules doivent être opérationnels à 100 %. Pour cela, une maintenance préventive sera mise en place par le service d'exploitation.

Aucun poste de gardiennage ne sera présent sur le site. En revanche, la centrale sera équipée d'un système de télégestion de l'installation. Ce système permet d'être averti en cas de défaillance et de réagir rapidement pour des opérations de maintenance corrective.

Les principales activités pendant la phase d'exploitation seront notamment :

- l'analyse des données enregistrées par la centrale d'acquisition (énergie solaire incidente, température des modules, énergie produite, énergie injectée dans le réseau, etc) ;
- le contrôle visuel des modules et des structures, la détection éventuelle d'objets masquant les cellules (cartons, plastiques, dépôt de poussière abusive) ;
- la vérification de l'état des câbles et des connecteurs ;
- la vérification de l'état des boîtes de connexion ;
- la vérification de la tenue de la structure et des modules ;
- les tests électriques des branches ;

- la vérification des onduleurs, éventuellement, thermographie infrarouge des armoires de protection ;
- la vérification des cellules et des connexions électriques ;
- la vérification des protections électriques, des protections anti foudre, de la continuité des masses et des liaisons à terre.

Conclusion

Le concept Agro-PV CPCL est un nouveau concept qui privilégie les espaces à faible valeur concurrentielle tout en garantissant la demande énergétique. Afin d'éviter la consommation des terres agricoles, le concept Agro-PV CPCL privilégie les périmètres et clôtures agricoles avec un aménagement d'un conteneur de stockage d'énergie adapté aux besoins énergétiques.

Le concept Agro-PV CPCL est une innovation de rupture, qui permet, au moyen de solutions de gestion de l'énergie et de non utilisation des surfaces utiles agricoles, de permettre un gain d'espace tout en produisant de l'électricité de façon abondante et compétitive. C'est une solution qui conjugue atténuation des changements climatiques et adaptations de l'agriculture aux aléas climatiques. Parce qu'il favorise le déploiement des centrales solaires fortement consommatrices d'espaces destinés pour la plupart aux agriculteurs, coopératives agricoles...

De ce fait le concept Agro-PV CPCL offre du point du vue :

- ✂ Pour le **producteur d'énergie** : d'avoir accès à de nouveaux espaces pour produire énergie compétitive à un coût inférieur (voir chapitre 3).
- ✂ Pour les agriculteurs et décideurs publiques : Une barrière de sécurité et de surveillance associé lui permettant de diversifier de revenus tout en ayant l'énergie nécessaire pour son exploitation.

Le chapitre 3 permettra d'avoir un aperçu beaucoup plus synthétique du concept Agro-PV CPCL.

CHAPITRE 3

ETUDE TECHNICO-COMMERCIALE DE L'AGRO-PV

CPCL : « Etude de Cas de l'AGROPOLE SUD »

Introduction

Dans ce chapitre, il sera question de faire une simulation technico-financière du concept Agro- PV CPCL au niveau de l'agropole sud à travers le logiciel PV-Syst et RETScreen Expert. L'étude technico-commerciale a pour objectif de vérifier qu'un projet est techniquement faisable et économiquement viable. Pour ce faire deux critères seront pris en compte :

- ❖ Le dimensionnement de l'installation par rapport aux besoins énergétiques et de la surface disponible réalisable par le logiciel PVSyst
- ❖ La viabilité économique, réalisable avec RETScreen Expert, évaluée en prenant en compte l'investissement (le coût de l'installation, y compris son raccordement au réseau de distribution électrique), les coûts d'opération et les gains annuels (qui correspondent à la vente d'électricité et/ou les économies réalisées). Le calcul actualisé permet de déterminer les indicateurs de rentabilité tels que le Taux de Rentabilité Interne (TRI) ou la Valeur Actuelle Nette (VAN), qui sont des éléments d'aide à la décision pour un porteur de projet

I Contexte et choix de simulation au niveau de l'agropole Sud

Le Gouvernement du Sénégal, avec l'appui de l'ONUDI, de la BAD, de la BID et du FVC, prépare la mise en place d'un Programme de Zone de Transformation Agroalimentaire (PZTA-Sud) en Casamance pour apporter un appui déterminant dans le processus de relance des activités économiques dans cette partie Sud du pays. Le Conseil d'administration de la Banque africaine de développement a approuvé 43,1 millions d'euros en faveur du Projet de zone de transformation agro-industrielle (PZTA-Sud ou Agropole Sud)

Le PZTA-Sud ou Agropole Sud qui s'inscrit dans le Plan Sénégal Emergent (PSE), vise plus particulièrement des perspectives durables dans le secteur rural qui occupe la plus grande partie de la population casamançaise et qui offre à court et moyen termes des possibilités de développement de la région. Ce secteur dispose de potentiels importants ainsi que des capacités de mettre en synergie d'autres branches de l'économie, notamment les industries agroalimentaires, et de servir de leviers pour d'autres secteurs tels que le transport et le commerce.

Les principales activités de l'agropole Sud concernent essentiellement les composantes ci-après :

- Un module principal qui sera implanté à Adéane, village situé sur la Nationale N6 à 30 km de Ziguinchor, dans le département de Ziguinchor, qui abritera des services et acteurs spécialisés dans les domaines de l'administration, le commerce et la logistique, les compétences et la formation, l'énergie et l'environnement, le financement et les communications, l'entretien et les services sociaux de base.
- Trois modules régionaux avec des infrastructures de transformation et de services qui s'y développeront progressivement. Les régions de Ziguinchor, Sédhiou et Kolda vont accueillir ces trois modules.
- Cinq plateformes départementales dotées d'infrastructures de collecte et de conditionnement des matières premières. Ces sites satellites serviront de centres de regroupement et éventuellement de prétraitement avant l'acheminement des produits vers les modules régionaux et/ou le module central à Adéane.
- La construction/réhabilitation de 230 km de pistes d'accès aux modules et zones de production.

Ces composantes du PZTA-Sud sont renforcées par l'appui du Fonds Vert Climat (FVC) dont les principales activités portent sur :

- La construction d'infrastructures post-récolte (magasins de stockage, de séchage, de traitement, de conditionnement pour les cultures vivrières de base, et alimenté par l'énergie solaire (**installation prévue de 2.834 kW de puissance donnée par l'agropole sud**) ;
- La promotion de la petite irrigation locale par la mise en place de systèmes d'irrigation goutte à goutte alimenté par des pompes solaires pour augmenter la production ;
- la création d'environ 20 ha de forêts gérées par les ménages agricoles de manière durable pour générer des revenus ;
- l'installation de 3 MW d'énergie renouvelable issus de la production de biogaz ou d'environ 6682,2 m³ de digesteur de biogaz pour traiter les effluents d'élevage et produire du biogaz pour le chauffage ou la production d'électricité[31].

La figure 23 illustre le plan d'aménagement de l'agropole Sud :



Figure 23 : Plan aménagement de l'agropole Sud [32]

Pour mieux prendre en compte les aspects environnementaux, améliorer la résilience climatique, renforcer l'efficacité énergétique des PME-PMI agricoles, développer l'agriculture irriguée et l'industrialisation verte, une requête de financement additionnelle a été soumise avec succès au Fonds Climat Vert (FVC).

Ainsi, le financement du FVC soutiendra deux principales activités :

- (i) soutenir l'accès des petits exploitants agricoles à la technologie d'un système d'irrigation goutte à goutte alimenté par des pompes solaires (capacité installée de 788,04 kW) pour promouvoir l'horticulture et le maraîchage et les cultures de rente pour une superficie d'au moins 11.940 ha ;
- (ii) investir dans l'amélioration des infrastructures post-récolte en renforçant la capacité des sociétés coopératives agricoles, des associations agricoles et des entreprises agro-industrielles dirigées notamment par des femmes et des ménages agricoles à transformer, sécher, stocker et emballer les productions des cultures vivrières de base en vue d'améliorer leur compétitivité. Cela impliquera l'installation de 2 834 kW d'énergie solaire pour l'éclairage, le traitement, le séchage et le conditionnement des cultures vivrières de base sur trois phases soit une superficie totale de 80 ha[33].

Dans la suite de notre travail, l'étude se fera sur 40 ha compte tenu de la première phase de réalisation et pourrait s'étendre par rapport à l'avancer des phases soit une superficie de 80 ha.

II Principe de dimensionnement centrale photovoltaïque

La méthode classique de dimensionnement d'un champ photovoltaïque consiste en premier lieu de connaître/évaluer les besoins en électricité et le profil de consommation. Ce qui nécessite de connaître la quantité d'électricité consommée par les différents postes de consommation ainsi que leur durée de fonctionnement. Pour ce travail, nous allons déterminer directement la configuration du champ grâce à la puissance demandée par l'agropole Sud et à aux périmètres des 40 ha.

II.1 Définition du champ PV

En connaissant la surface disponible et l'énergie demandée, Il faut maintenant définir les paramètres du champ. On choisit d'abord l'élément de base, le panneau PV, dans la bibliothèque des composants disponibles sur le marché. Le programme suppose que tous les panneaux du système sont identiques. On définit ensuite le nombre de panneaux, et leur interconnexion en série/parallèles, avec les possibilités de regroupement. Plusieurs panneaux en série et parallèle forment des groupes ; on peut éventuellement connecter plusieurs groupes en série et/ou parallèle pour former un champ. Un champ est connecté sur une entrée d'onduleur via un régulateur ou un onduleur régulateur. Le système peut comporter plusieurs champs identiques (avec plusieurs onduleurs).

II.1.1 Puissance crête du champ PV

La puissance du champ est fonction de l'énergie et du temps par la formule :

$$P_C = \frac{E_p \cdot P_i}{E_i} \quad (\text{eq.1})$$

Où :

P_C : la puissance crête du champ photovoltaïque.

P_i : la puissance radiative dans la condition standard de test (conditions STC), exprimée en kW/m². Donc, $P_i = 1 \text{ kW/m}^2$.

E_i : l'irradiation solaire journalière reçue par une surface unitaire (1 m²) du champ photovoltaïque, en prenant en compte l'orientation et l'inclinaison de celui-ci

II.1.2 Détermination du nombre de panneaux photovoltaïques

A partir de la puissance crête des panneaux on détermine le nombre de panneaux solaires photovoltaïques nécessaires à l'installation. Pour cela, nous avons appliqué la formule suivante :

$$N_{pv} = \frac{P_c}{P_d} \quad (\text{eq.2})$$

Où :

N_{pv} : le nombre de panneaux solaires photovoltaïques

P_d : la puissance crête en W de chaque panneau PV

II.1.3 Détermination du nombre de panneaux en série ou de la puissance de l'onduleur

Le nombre maximum de panneaux photovoltaïques en séries se calcule par la formule :

$$N_{pvmaxserie} = \frac{U_{maxond}}{V_{oc}} \quad (eq.3)$$

Où :

N_{pvmaxsérie} : Nombre de PV max en série

U_{maxond} : tension maximale d'entrée que peut supporter l'onduleur

V_{oc} : la tension à circuit ouvert

II.1.4 Détermination du nombre de panneaux en parallèle

Le nombre de panneaux photovoltaïques en parallèles se calcule par la formule :

$$N_{pvmaxparallèle} = \frac{N_{pv}}{N_{pvmaxseries}} \quad (eq.4)$$

Où :

N_{pvmaxparallèle} : Nombre de PV max en parallèle

II.2 Dimensionnement de l'onduleur

Nous pouvons penser, en première analyse, qu'il suffit de connecter une puissance du champ PV égale à la puissance maximale de l'onduleur. Dans la réalité, c'est la démarche la plus suivie. Mais nous allons voir que ce n'est pas la meilleure. En fait, l'efficacité d'un onduleur est maximale aux environs de la moitié de sa puissance nominale, et qu'elle décroît lorsque la puissance diminue. Il est donc déconseillé d'utiliser un onduleur surdimensionné par rapport à la puissance effective du champ, car il travaillera plus souvent dans la partie du code d'efficacité. Dans ce cas de figure, il est beaucoup plus aisé de se demander quelle est la puissance optimale du champ pour un onduleur donné :

- ✓ Il faut d'une part se rappeler que la puissance nominale de l'onduleur est habituellement exprimée en termes de puissance de sortie : la puissance maximale correspondante du champ sera donc :

$$P_{DCmax} = \frac{1}{\epsilon} * P_{ACmax} \text{ (eq. 5)}$$

Où

ϵ : le rendement de l'onduleur

- ✓ D'autre part, la puissance maximale DC ne doit pas être confondue avec la puissance nominale du champ, définie pour les conditions standard. La puissance maximale que l'on peut tirer du champ est liée à l'ensoleillement dans le plan considéré et à la température du champ dans les conditions d'irradiation maximum. Elle n'est pas définie a priori, on peut recourir au logiciel PVSYST pour la déterminer.

II.3 Dimensionnement du stockage

II.3.1 Capacité des batteries

L'estimation de la capacité des batteries est nécessaire pour cette installation, elle se calcule :

$$C_J = \frac{N_J * E_J}{D_p * U_{syst}} \text{ (eq. 6)}$$

Où :

C_J : La capacité journalière de stockage

N_J : Nombre de jours d'autonomie

E_J : Energie journalière

D_p : profondeur de décharge de la batterie

U_{syst} : Tension du système

II.3.2 Nombre de branche de batterie :

Le nombre de batteries pour une installation se calcule par la formule suivante :

$$N_{batt} = \frac{C_J}{C_d} \text{ (eq. 7)}$$

Où :

N_{batt} est le nombre de batteries totales

C_d est la capacité d'une batterie disponible

II.3.3 Nombre de batteries en séries

Le nombre de batteries en séries se calcul par la formule suivante :

$$N_{battserie} = \frac{U_{syst}}{U_{batterie}} \text{ (eq. 8)}$$

II.4 Dimensionnement sections câbles et protection DC

Le choix de la section des câbles s'est fait grâce à un abaque de sélection de câble de chute de tension 3 %.

II.4.1 Choix des sections

Courant sur la section entre le panneau et l'onduleur

Le courant sur la section entre le panneau et l'onduleur correspond au courant maximal admissible de l'onduleur.

Courant sur la section entre les batteries et l'onduleur

Le courant sur la section entre les batteries et l'onduleur se calcule par la formule suivante :

$$I_{sect \text{ batt-ond}} = \frac{P_{elec} * k_s}{U_{syst}} \text{ (eq. 9)}$$

Où :

$I_{sect \text{ batt-ond}}$: le courant sur la section entre les batteries et l'onduleur

P_{elec} : Puissance électrique demandée

k_s : Coefficient de simultanéité

Courant sur la section entre l'onduleur et les charges

L'intensité maximale délivrée par l'onduleur se calcul par la formule suivante :

$$I_{del \text{ ond}} = \frac{P_{elec}}{U_s * \cos\phi} \text{ (eq. 10)}$$

Où :

$I_{del\ Ond}$: l'intensité délivrée par l'onduleur

U_s : tension délivrée par la SENELEC

$\cos\phi$: facteur de puissance

II.4.2 Choix de la section du câble

En pratique, un câble n'est pas un conducteur parfait : il se comporte comme une résistance. Dans une installation photovoltaïque, cela va induire des pertes de puissance. Le choix des câbles se fait suivant le courant circulant au niveau de la section, la distance et la tension. Le dimensionnement des câbles est basé sur l'équation (eq. 11) et l'équation (eq. 12) selon le cas :

$$A_M = \frac{LM * P}{3\% * U^2 * \rho_M} \text{ (eq. 11)}$$

ρ_M : Conductivité électrique ($\rho_{Cu} = 56$, $\rho_{Al} = 34$)

A_M : Section du câble [mm²]

L_M : Longueur totale du câble (Plus + Moins) [m] P : Puissance transmise dans le câble [W]

P : Puissance transmise dans le câble [W] U : tension du système [V]

$$A_M = \frac{L_{IM} * P}{3\% * U^2 * \rho_M} \text{ (eq. 12)}$$

L_{IM} : Longueur de câble simple [m]

L'abaque de choix de la section de câbles en CC est mis en annexe 1 et AC en annexe 2.

A basse tension, les courants sont généralement élevés, cause pour laquelle les longueurs à basse tension doivent être courtes pour éviter des chutes de tension importantes.

III Dimensionnement du concept Agro-PV CPCL avec PVSYST

Nous distinguerons deux niveaux de dimensionnement des installations : d'abord un prédimensionnement grossier, au stade de l'avant-projet, à l'aide d'une feuille excel; puis une étude fine, en vue de la réalisation, en s'appuyant sur le logiciel PVSYST. Nous verrons ensuite les mesures à effectuer sur l'installation, à la réception et en exploitation, ainsi qu'une manière normalisée de présenter les résultats.

III.1 Présentation de logiciel de simulation PVSYST

PVSYST est un logiciel conçu pour être utilisé par les architectes, les ingénieurs et les chercheurs, mais aussi un outil pédagogique très utile. Il inclut une aide contextuelle approfondie, qui explique en détail la procédure et les modèles utilisés et offre une approche économique avec guide dans

Mémoire de Master en EnR/EE
 le développement d'un projet. PVSYST permet d'importer des données météo d'une dizaine de sources différentes ainsi que des données personnelles. Dans notre cas nous avons utilisé la dernière version **PV syst 7.3.2**. Dimensionnement du concept Agro-PV CPCL avec le logiciel PVSYST

Le dimensionnement du concept Agro-PV CPCL est basé sur une procédure rapide et simple :

- ❖ Spécifier la puissance désirée
- ❖ Choisir les modules PV dans la base de données du marché local sénégalais
- ❖ Choisir le conteneur de stockage

PV syst propose une configuration de système, qui à partir de la puissance nominale désirée ou de la surface disponible permet de réaliser une première simulation/évaluation du champ PV.

La figure 24 illustre la configuration du concept Agro-PV CPCL avec le logiciel PVSYST.

Le dimensionnement du concept à travers le logiciel PVSYST révèle une puissance de 3559 kW (Soit 9880 PV de 360 Wc) avec une surface d'utilisation des panneaux photovoltaïques de 19592 m².

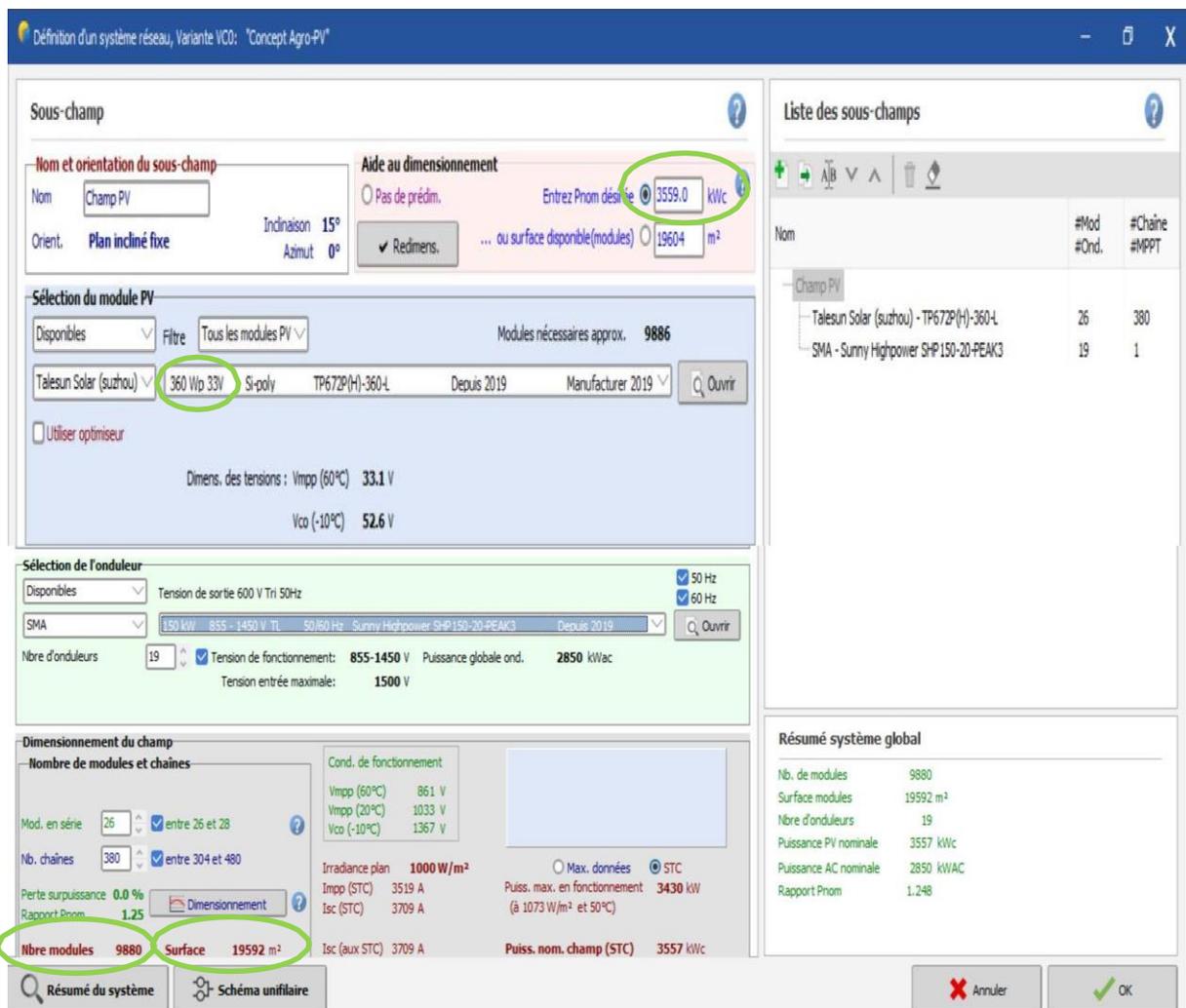


Figure 24: configuration du concept Agro-PV CPCL dans PVSYST

La figure 25 illustre la variante composante opérationnelle du concept Agro-PV CPCL indiquant :

- ✓ Le site d'installation ainsi le type système dans notre cas raccordé au réseau ;
- ✓ Les différents composants du champ et leurs puissances respectives ;
- ✓ Les principaux résultats tels que la production annuelle du système, l'indice de performance et les pertes de champ.

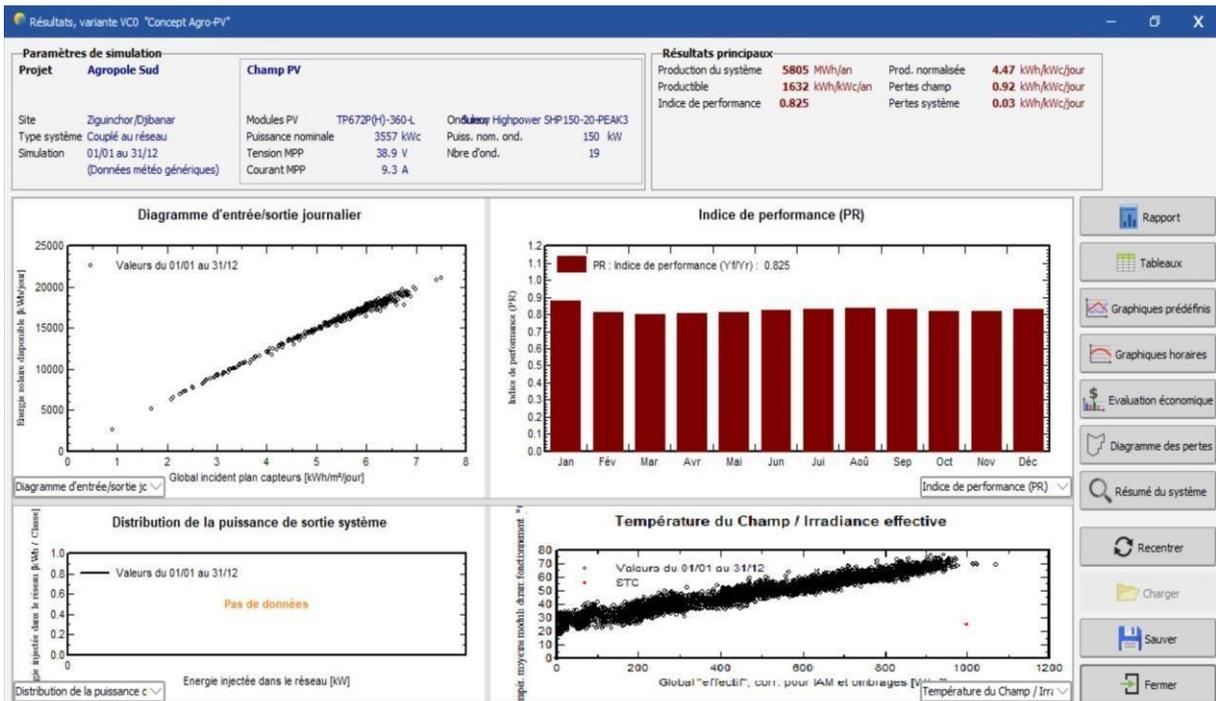


Figure 25: variante composante opérationnelle du concept Agro-PV CPCL

III.2 Dimensionnement manuel du concept Agro-PV CPCL et comparaison avec une centrale photovoltaïque au sol.

Il serait intéressant de faire une analyse technique comparative pour mieux situer les avantages techniques du concept Agro-PV CPCL par rapport à une centrale photovoltaïque au sol.

III.2.1 Dimensionnement théorique du Concept Agro-PV CPCL

Pour rappel l'installation prévue est de 2 834 kW d'énergie solaire valeur donnée par l'agropole Sud. Le tableau 12 donne les différents résultats avec un dimensionnement basé sur des calculs théoriques.

Désignation	Concept Agro-PV
Superficie Agropole-Sud à exploiter	
Surface (40 ha)	400mx1000m
Périmètre ou contour	4800 m
Principaux composants Concept Agro-PV CPCL	
Dimension PV (360Wc)	1,92mx1mx0,04m
Pylône	8 PV de 360 Wc
Puissance par pylône	2880 Wc
Longueur occupée par Pylône	3,88 m
Largeur occupée par la Pylône	4,016 m
Surface Pylône	15,59 m ²
Nombres de Pylône total sur 4 800 m le long de la clôture	1236 avec une puissance de 3 559 680 Wc soit 3,559 MWc
Surface occupée par la totalité des pylônes	1,93 ha
Nombre de Panneaux Photovoltaïques	9888 PV de 360 Wc
Puissance Produite par le Concept Agro-PV CPCL	3559 kWc
Ensemble Câble DC PV	100 000 m
Energie produite par le Concept Agro-PV CPCL	28 477 kWh
Conteneur de stockage solaire	3 MWh

La puissance totale d'installation du concept Agro-PV CPCL est de **3559 kW** supérieur à la demande énergétique qui est de **2 834 kW** soit un gain en termes de puissance de **725 kW** et en termes de surface de **3924,56 m²**.

Ces résultats entrent en étroite corrélation avec les résultats trouvés au niveau du logiciel PVSYST.

III.2.2 Dimensionnement théorique de la centrale au sol

Lorsque l'on souhaite s'équiper d'une installation solaire, il est indispensable d'effectuer les étapes suivantes :

- ✓ L'estimation de la consommation d'énergie ou de la demande énergétique ou le cahier de charge,
- ✓ Calculer la puissance de l'installation nécessaire,
- ✓ Choisir son onduleur solaire,
- ✓ Choisir ses batteries solaires.

Tableau 13: Dimensionnement théorique d'une centrale au sol

Désignation	Centrale au Sol
Superficie Agropole-Sud à exploiter	
Surface (40 ha)	400mx1000m
Périmètre ou contour	4800 m
Principaux composants de la centrale au sol	
Dimension PV (360 Wc)	1,92mx1mx0,04m
Nombre de Panneaux Photovoltaïques	7872
Puissance Produite par la centrale au sol	2834 kW
Energie produite	22 672 kWh
Longueur ensemble câble DC PV	170 000 m
Quantité d'onduleur 3 MWh	1
Quantité stockage (OPZV 2V 2000 Ah GEL)	24
Surface occupée par la centrale au sol	5,28 ha

III.3 Analyse comparative Concept Agro-PV CPCL et centrale au sol

Les centrales photovoltaïques au sol présentent le désavantage d'être consommateurs d'espace au sol. Pour une centrale au sol conventionnelle, l'occupation correspond à 1 à 1,5 ha pour un mégawatt crête installé. En termes de puissance ; elle répond à la puissance demandée voir l'énergie demandée. D'autre part le choix du stockage relève du besoin d'énergie nocturne ou d'accumulateur durant la journée.

Rendement Agrivoltaïque (R_{AV})

Dans ce travail, l'innovation est surtout l'utilisation d'un nouveau paramètre d'évaluation du concept Agro-PV.

En effet, Le Rendement Agrivoltaïque est un nouveau paramètre, par analogie au paramètre agricole (le Rendement agricole à l'hectare), permettant d'évaluer l'impact d'une installation solaire sur la surface occupée et inutilisable par ailleurs. Il est défini par le rapport entre la puissance produite par une installation PV en MW ou kW et la surface occupée par l'installation en ha ou m^2 (équation n°13).

$$R_{AV} = \frac{P(\text{MW ou kW})}{S(\text{ha ou } m^2)} \text{ (eq. 13)}$$

Ce paramètre est fondamental car il permet de faire le choix entre deux concepts d'occupation de surface afin de minimiser la surface occupée par une installation PV très importante pour l'agriculture en outre c'est une aide à la prise de décision sur le concept Agro-PV à choisir.

NB : A ne pas confondre avec la puissance par m² fournie par un panneau solaire.

Le tableau 14 donne les résultats comparatifs entre le concept Agro-PV CPCL et la centrale au sol.

Tableau 14 : Tableau comparatif entre le concept Agro-PV CPCL et la centrale photovoltaïque au sol.

Système	Puissance crête (MW)	Surface occupée (ha)	R _{AV} (MW/ha)	Surface perdue (ha)	Gain Récolte (kg/an)	Gain en 20 ans d'exploitation
Concept CPCL	2,834	1,53	1,85	0	1500	30 T
Centrale au Sol	2,834	5,28	0,53	3,75	-1500	-30 T

La figure 26 illustre l'analyse comparative du Concept Agro-PV CPCL et une centrale au sol.

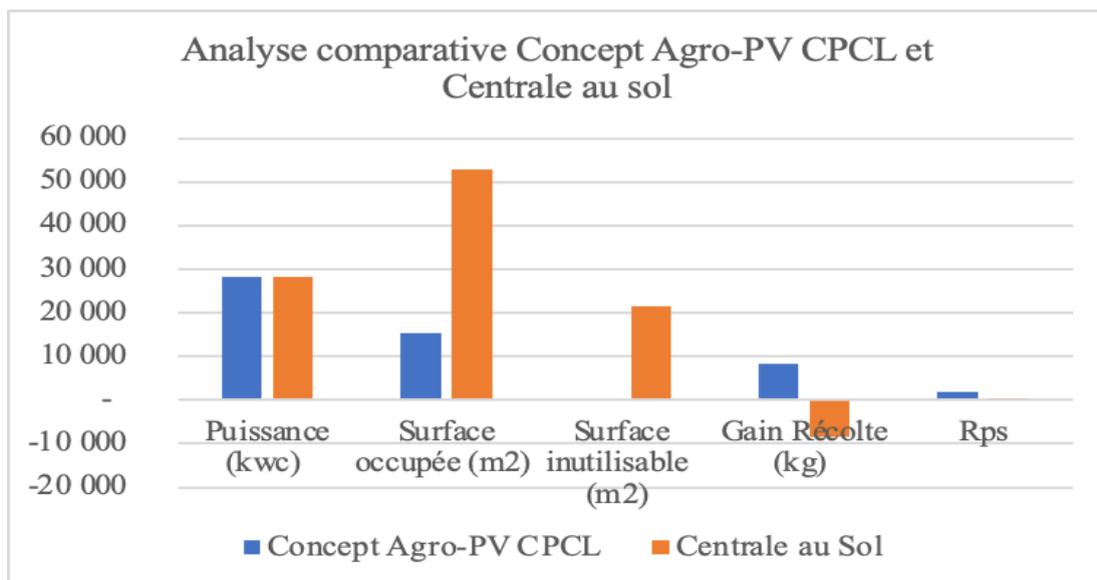


Figure 26: Analyse comparative Concept Agro-PV et Centrale au sol

Le concept Agro-PV CPCL est plus avantageux que la centrale au sol du fait qu'avec la même puissance et la même énergie, le concept Agro-PV CPCL, contrairement au central au sol, occupe un rendement à l'hectare de 1,85 MW contre 0,53 MW/ha. Ce résultat offre ainsi de nouvelles opportunités en termes de gain de récolte et de surplus d'énergie pour les exploitations agricoles d'une part. L'évaluation de la différence de rendement en termes de

Mémoire de Master en EnR/EE
production d'énergie par surface occupée et du gain en surface permet de faire une économie en termes de production agricole de 1500 kg de noix de cajou par an correspondant à 30 Tonnes en 20 ans d'exploitation.

Le concept Agro-PV CPCL répond aux besoins énergétiques avec un gain d'énergie et d'espace utile cultivable d'une part, réduit l'ombrage et ne constitue pas un barrage contre l'infiltration des eaux de pluies de manière homogène, d'autre part.

III.4 Analyse de la faisabilité économique du projet

L'analyse financière représente le processus qui permet d'établir la valeur économique d'un investissement. La première étape consiste à réaliser un plan de financement prévisionnel et un bilan économique afin de voir si le projet énergétique est rentable. La deuxième étape de l'évaluation d'un investissement consiste à calculer des mesures financières qui peuvent être utilisées pour évaluer et comparer des projets énergétiques. Cette section se focalise sur des théories et des méthodes d'évaluation microéconomiques afin de mesurer le rapport coût efficacité de projets définis. L'analyse financière va permettre d'estimer les flux de trésorerie d'un projet, qui déterminent sa valeur [34].

III.4.1 Plan de financement et bilan économique prévisionnels

Le coût évité de l'électricité autoconsommée est fortement variable d'un projet à l'autre et cela pour une même puissance. Il varie en fonction du site d'implantation, de la taille de l'installation, du tarif en vigueur, etc. Le prix que paie une société / une personne physique lors de l'achat d'électricité, varie en fonction du plan tarifaire choisi et de sa consommation annuelle et du type de compteur installé (voir grille tarifaire SENELEC 2022). Les tarifs sont différents selon que la consommation d'électricité soit faite durant les heures pleines (hp) ou les heures creuses (hc). En général, les heures pleines correspondent aux heures de journée (+/- de 7 à 22h) hors week-end et les heures creuses correspondent aux heures de nuit (+/- 22 à 7h) de la semaine et aux heures de week-end [35]. Le coût évité correspond à la production de l'installation multipliée par le prix d'achat indexé et pondérée par le ratio hp/hc (heures pleines/heures creuses) et par le taux d'autoconsommation :

Coût électricité autoconsommée = Production électrique (MWh) * Tarif électricité

(FCFA/MWh) * hp/hc * Taux autoconsommation (**eq. 14**)

La figure 27 illustre le classement mensuel des centrales par coûts variables de production (F/kWh) (Source Rapport d'évaluation SENELEC 2022).

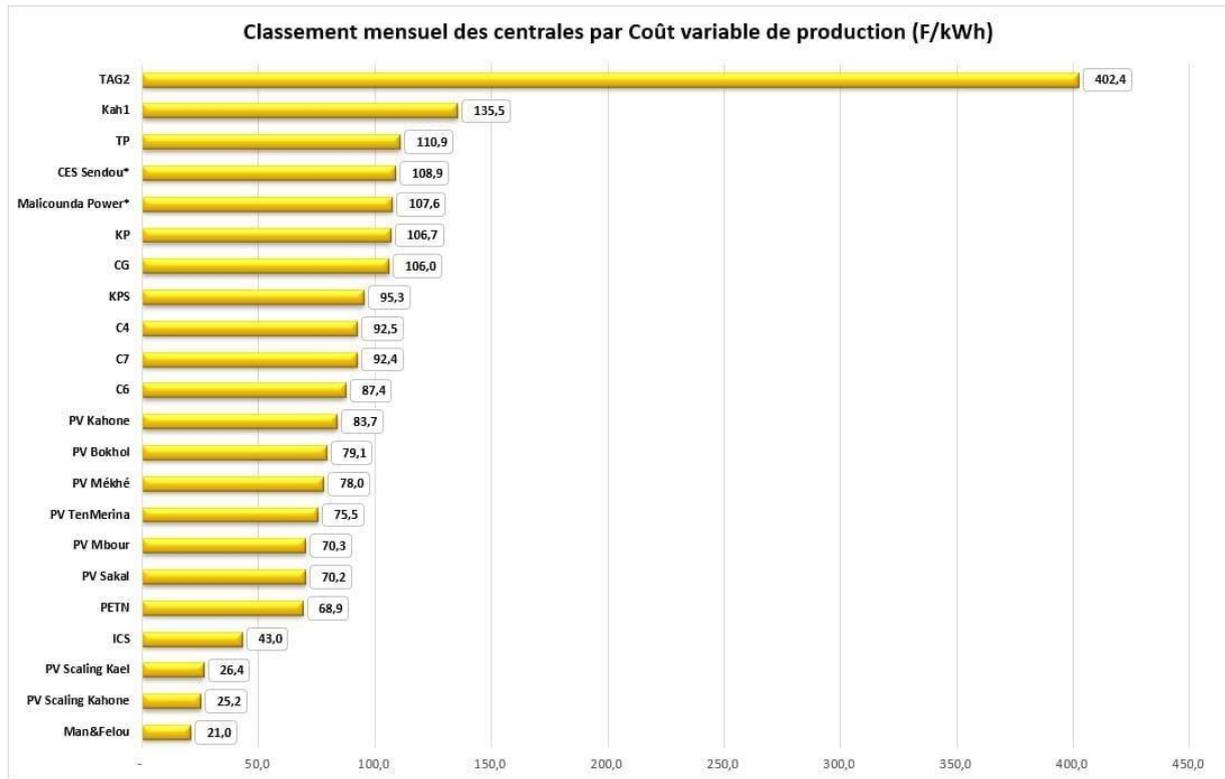


Figure 27: Classement mensuel des centrales par coûts variables de production (F/kWh)

III.4.2 Mesures financières

Lors de l'évaluation d'un investissement, le bailleur ou investisseur du projet a besoin d'un moyen pour identifier si le projet est ou non rentable afin de prendre la décision d'accepter ou de refuser le projet. Pour cela, il existe une large palette de mesures financières qui peuvent être utilisées pour évaluer et comparer des projets énergétiques. Ceux-ci comprennent des rat mesures temporelles (TRA), des taux de rendement (TRI), des indicateurs de coût (CAE) et des valeurs monétaires agrégées (VAN).

III.4.2.1 Temps de Retour (TR) et Temps de Retour Actualisé (TRA)

Le temps de retour représente la période de temps nécessaire pour rembourser le coût de l'investissement, pour récupérer en cash-flows l'investissement initial d'un projet. Il indique le nombre d'années à partir desquelles l'investissement est rentable, c'est-à-dire, durant lesquelles l'investisseur court un risque. Cette période est atteinte lorsque les cash-flows nets cumulés égalent les flux nets d'investissement [36]. Pour les projets qui ont des flux annuels constants de trésorerie entrants et sortants, la période de remboursement est donnée par :

$$TR = \frac{F_c}{F_{no}} \text{ (eq. 15)}$$

- F_c : capital initial lié à l'investissement (subsides non compris)
- $F_{n,0}$: Cash-flows annuels nets d'exploitation (réels et non-actualisés)

III.4.2.2 Valeur Actuelle Nette (VAN)

La valeur actuelle nette chiffre le gain de l'investissement après une durée fixée, en tenant compte des investissements et gains annuels du projet. La VAN d'un projet d'investissement est calculée sur base des flux de trésorerie d'exploitation et son calcul permet de prendre en considération l'ensemble des estimations de flux de trésorerie [37]. Le calcul de la valeur actuelle nette est donné par la formule suivante :

$$VAN = \sum_{n=0}^N \frac{(B_n - C_n)}{(1+d)^n} \quad (\text{eq. 16})$$

$$VAN = \sum_{n=0}^N \frac{F_{n,n}}{(1+d)^n} \quad (\text{eq. 17})$$

Où :

- B_n : recettes de l'année n (flux de trésorerie entrants année n) ;
- C_n : coûts de l'année n (flux de trésorerie sortants année n) ;
- $F_{n,n}$: cash-flow net à l'année n (flux de trésorerie année n) ;
- N : durée de vie économique du projet ;
- d : taux d'actualisation annuel.

III.4.2.3 Taux de Rentabilité Interne (TRI)

Le taux de rentabilité interne évalue le rendement et la rentabilité de l'investissement, en supposant que chaque gain financier est placé à un taux fixe [38]. Il s'agit du taux de croissance qu'un projet est supposé atteindre. Le TRI correspond au taux d'actualisation qui permet d'annuler la valeur actuelle nette des flux entrants et sortants. Sous cette condition, la somme des flux monétaires actualisés entrants est donc égale à la somme des flux monétaires nets sortants sur la durée de vie du projet. Le TRI est exprimé comme suit :

$$TRI = \sum_{n=0}^N \frac{F_{i,n}}{(1+irr)^n} = \sum_{n=0}^N \frac{F_{0,n} + F_{c,n}}{(1+irr)^n} \quad (\text{eq. 18})$$

Où :

- $F_{i,n}$: flux de trésorerie entrants de l'année n ;
- $F_{o,n}$: flux de trésorerie sortants de l'année n ;
- $F_{c,n}$: flux de trésorerie d'investissement de l'année n ;
- N : durée de vie économique ;
- irr : le taux d'actualisation qui satisfait l'égalité.

III.4.3 Coût du cycle de vie (CCV)

Le coût du cycle de vie d'un projet représente la somme de tous les coûts actualisés sur la durée de vie du projet. Le CCV comprend les flux monétaires sortants liés à l'investissement, les coûts d'installation et d'exploitation, les coûts de maintenance ainsi que les subsides et autres coûts monétaires liés au projet. Par contre, l'indicateur ne prend pas en compte les flux monétaires entrants (vente et économie d'énergie) et le coût de l'énergie [39]. Le coût du cycle de vie est donné par l'équation suivante :

$$CCV = \sum_{n=0}^N \frac{(F_{c,n} + F_{o,n})}{(1+irr)^n} \text{ (eq. 19)}$$

Où :

- CCV : la valeur actuelle du coût du cycle de vie ;

III.5 Analyse des différents moyens de financement

Au Sénégal, depuis 2012, le photovoltaïque s'est fortement développé ces dernières années suite à la volonté croissante des individus et des organisations de diminuer leur impact carbone et d'être autonome énergétiquement. Par ailleurs, les projets de production d'énergies renouvelables sont caractérisés par un investissement initial conséquent avec des bénéfices répartis tout au long de la durée de vie du système de production. Le financement d'un investissement énergétique peut donc altérer sa viabilité économique. C'est pourquoi, il semble intéressant d'étudier les différents modes de financement possibles afin d'identifier ceux qui favorisent les investissements dans les économies d'énergie. Dans cette section, deux moyens de financement adaptés à l'installation d'un système photovoltaïque seront développés : les mécanismes basés sur les contrats d'énergie, appelés tiers-financement et les mécanismes standards d'investissement, via emprunt bancaire. Le choix du mode de financement est crucial dans l'évaluation de la rentabilité d'un projet photovoltaïque. L'objectif de cette partie est donc d'identifier les avantages et les inconvénients de ces deux modes de financement et de déterminer lequel est le plus avantageux. Comme l'étude porte sur les grandes installations photovoltaïques (>10 kW) implantées au sein d'entreprises, le

III.5.1 Financement interne via l'emprunt

Dans le cas du financement interne, l'investisseur prend entièrement à sa charge le coût de l'investissement et garde, de ce fait, l'entièreté des économies réalisées. L'annuité constante de remboursement est calculée via la formule mathématique suivante :

$$A = V_0 * \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}} \quad (\text{eq. 19})$$

Où :

- V_0 : Valeur initiale du prêt/de l'investissement ;
- i : Taux d'intérêt et n : Durée de l'emprunt

III.5.2 Tiers-financement

Le tiers-financement implique quatre acteurs : le client, l'installateur, le tiers-investisseur et la banque. Ce mode de financement permet à une organisation de financer des investissements énergétiques sans mobiliser de fonds propres et sans toucher à ses capacités d'endettement.

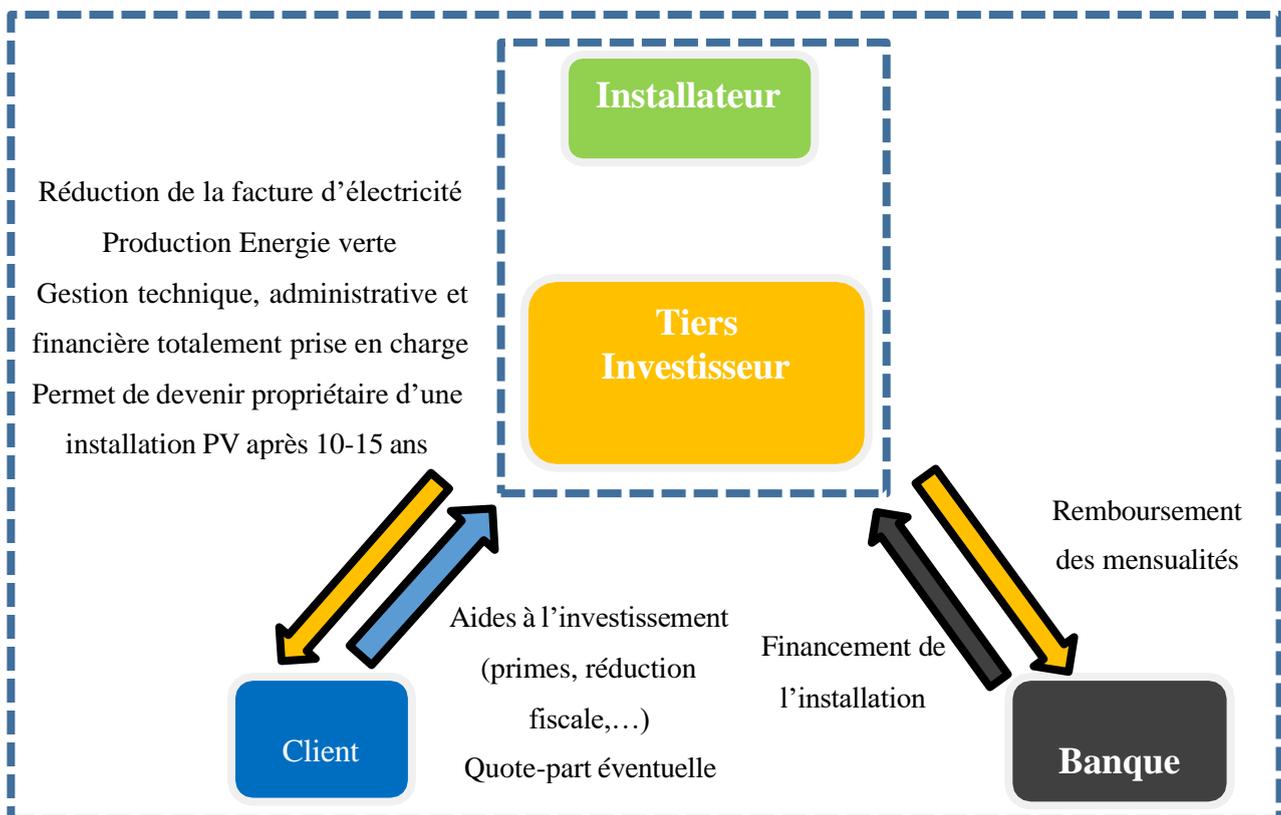


Figure 28: Schématisation du principe de tiers-financement

« Un tiers investisseur offre ses services à un client désireux de devenir producteur d'énergie verte. Il garantit, via une banque ou une institution financière, le financement d'une installation photovoltaïque. Le client bénéficie alors d'une réduction directe de sa facture d'électricité grâce à la

Mémoire de Master en EnR/EE
production électrique du système photovoltaïque et le tiers-investisseur récupère le montant investi et rémunère son service, selon le type de contrat, en récupérant une partie ou l'entièreté des certificats verts ainsi que les aides à l'investissement » [40].

III.6 Simulation Financière du concept Agro-PV avec le logiciel Retscreen Expert

III.6.1 Présentation du logiciel Retscreen Expert

Le logiciel **expert RETScreen**[®] est un outil d'aide à la décision intelligent qui permet aux parties prenantes d'identifier, d'évaluer, d'optimiser et de suivre rapidement la performance des investissements dans les énergies propres tout au long du cycle de vie du projet. Le logiciel peut être utilisé pour évaluer [41] :

- Options d'énergie propre
- Économies et coûts de production d'énergie
- Viabilité financière et risque pour les énergies renouvelables et les technologies d'efficacité énergétique
- La performance des projets mis en œuvre

III.6.2 Étude financière Concept Agro-PV

Cette étude financière permet d'identifier, d'évaluer et d'optimiser de façon rapide la viabilité technique et économique du concept Agro-PV en matière d'énergies propres. Pour ce fait plusieurs critères seront pris en compte tel que le lieu d'installation, la puissance demandée, le coût de l'installation.

III.6.2.1 Données climatiques Agropole Sud (Adéane)

L'application affiche toutes les informations climatiques de la zone sous forme de tableau contenant les informations suivantes : le rayonnement solaire, pression atmosphérique, vitesse du vent et température de l'air pour chaque mois. Nous pouvons introduire les informations pour un site qui n'est pas dans la base des données.

La figure 29 mis en annexe 3 permet de suivre la courbe d'évolution du rayonnement solaire et de la température de l'air en fonction des mois de l'année avec une orientation plein su ; nous constatons une forte quantité de rayonnement solaire, ce qui explique les températures élevées dans la région avec une moyenne de rayonnement solaire de **5,7 kWh/m²/j** au mois d'avril (source Atlas solaire mondial).

III.6.2.2 Choix du système d'installation

Les centrales photovoltaïques produisent de l'électricité grâce aux rayons du soleil. Elles

Mémoire de Master en EnR/EE
exploitent ces derniers pour les transformer en une énergie propre, inépuisable et gratuite. Le choix de l'installation de cette dernière s'est fait suite à la demande énergétique de l'agropole Sud (Voir chapitre 2).

III.6.2.3 Choix du modèle énergétique

Le choix du modèle énergétique doit tenir compte de nombreux critères et paramètres : connaissance et disponibilité des ressources, maîtrise des besoins et impacts (climatique, écologique, sanitaire, agricole), vulnérabilités et gestion des risques, faisabilité, conséquences économiques et sociales. Une possibilité de mixte énergétique n'est pas à négligée prenant en compte que les autorités sénégalaises ont ainsi adopté une stratégie de diversification du mixte électrique, fixant à 30% la part des énergies renouvelables dans le mixte électrique d'ici à 2025, provenant principalement de l'énergie solaire et dans une moindre mesure d'énergie éolienne[42].

III.6.2.4 Etude financière du concept Agro-PV

Dans cette étape de l'étude du projet ; nous allons voir l'estimation économique du concept Agro-PV pour l'autonomisation énergétique de l'agropole sud en fonction des coûts et des éléments du concept Agro-PV.

La figure 30 mise en annexe 4 illustre l'analyse des coûts du concept Agro-PC CVPCL et la figure 30 mise en annexe illustre l'analyse financière du concept Agro-PC CVPCL. Le coûts d'investissement qui est de 2 563 094 113 FCFA avec une économie et revenus annuels de 387 112 704 FCFA, un TRI avant impôts-capitaux propres de 29,5% et un retour sur les capitaux propres de 3,7 ans.

Le tableau 15 illustre la rentabilité du projet avec un bénéfice annuel de 399 608 306 FCFA soit 7 992 166 111 FCFA sur la durée de vie du projet. La VAN du projet est estimée à 2 052 039 861 FCFA ; et le taux de rentabilité interne égale à 32% supérieur au taux d'endettement qui est de 25%. Nous obtenons après actualisation des coûts de l'énergie, un LCOE de 60 FCFA (Prix de vente du kilowattheure du Concept Agro-PV CPCL).

Rentabilité du Projet		
Compte d'exploitation		Unité
Estimation recettes sur les 20 ans	12 302 254 080	FCFA
Charges prévisionnelles sur les 20 ans (Y Compris coût d'investissement)	4 310 087 969	FCFA
Bénéfice du Projet sur 20 ans	7 992 166 111	FCFA
Bénéfice du Projet annuel	399 608 306	FCFA
Compte d'exploitation -10% Recettes		Unité
Estimation recettes sur les 20 ans	11 072 028 672	FCFA
Charges prévisionnelles sur les 20 ans (Y Compris coût d'investissement)	4 310 087 969	FCFA
Bénéfice du Projet sur 20 ans	6 761 940 703	FCFA
Bénéfice du Projet annuel	338 097 035	FCFA
Compte d'exploitation -10% Charges		Unité
Estimation recettes sur les 20 ans	12 302 254 080	FCFA
Charges prévisionnelles sur les 20 ans (Y Compris coût d'investissement)	3 879 079 172	FCFA
Bénéfice du Projet sur 20 ans	8 423 174 908	FCFA
Bénéfice du Projet annuel	421 158 745	FCFA
VAN	TRI	DRCI
2 052 039 861	32%	3,7

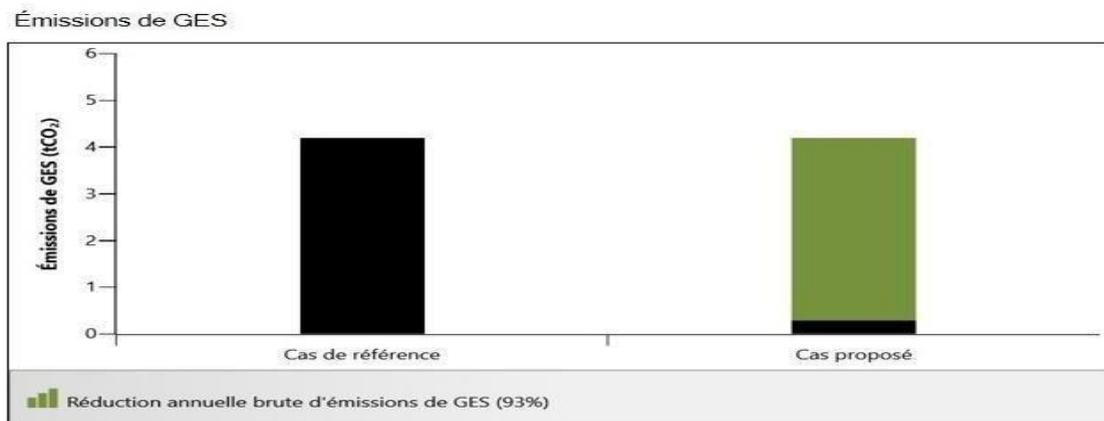
III.6.2.5 Analyse Émission GES et Risques

III.6.2.5.1 Analyse Émission GES

Le Bilan GES a pour objectif, selon l'Agence pour la Transition Écologique (ADEME), de « réaliser un diagnostic des émissions de gaz à effet de serre des acteurs publics et privés, en vue d'identifier et de mobiliser les gisements de réduction de ces émissions. ». Ce point est considéré comme l'un des propres objectifs essentiels des projets d'énergie propres, car le Sénégal a l'intention de réduire conditionnellement ses émissions de gaz à effet de serre (GES) d'au moins 23 % d'ici 2030 [43]. La figure 31 illustre l'émission de gaz à effet de serre qui est de 0,3tCo₂

Mémoire de Master en EnR/EE
 contre 4,2t tCO₂ de L d'essence, permettant ainsi de faire une réduction annuelle brute d'émission
 e GES de 3,9 tCO₂

Émissions de GES



Équivalences de GES



Émissions de GES		
Cas de référence	4,2	tCO ₂
Cas proposé	0,3	tCO ₂
Réduction annuelle brute d'émissions de GES	3,9	tCO₂

.Figure 31 : Émission de GES du projet

III.6.2.5.2 Analyse risque du projet

Sachant que le **risque zéro** n'existe pas, des risques du point de vue électrique, incendie et professionnels sont générés par une installation de centrales photovoltaïques [44].

La figure 32 illustre l'analyse risque du concept Agro-PV qui est de 10% avec comme intervalle de confiance compris entre $2,9 < IC < 4,6$.

Effectuer l'analyse sur	Retour sur les capitaux propres				
Nombre de combinaisons	1000				
Valeur de départ aléatoire	Oui				
Paramètre	Unité	Valeur	Plage (+/-)	Minimum	Maximum
Coûts d'investissement	XOF	2 563 094 113	10%	2 306 784 701	2 819 403 524
Électricité exportée au réseau	MWh	5,63	25%	4,22	7,03
Ratio d'endettement	%	70,0%	25%	52,5%	87,5%
Taux d'intérêt sur la dette	%	7,00%	25%	5,25%	8,75%
Durée de l'emprunt	an	15	25%	11	19
Médiane				an	3,8
Niveau de risque				%	10%
Minimum de l'intervalle de confiance				an	2,9
Maximum de l'intervalle de confiance				an	4,6

Figure 32 : Analyse risque concept Agro-PV

Conclusion

Après la réalisation de l'analyse technico-financière du projet ; le prix du kilowattheure de la centrale solaire photovoltaïque est bénéfique pour l'agropole Sud, parce que la centrale est productive de 07h à 18h (en générale), qui représente 60% de prix du kilowattheure de la SENELEC aux heures de pointe (144,65 F CFA) et 40% de prix du kilowattheure de la SENELEC aux heures pleines (90,41 FCFA) qui est supérieur au coût minimum de vente du kWh solaire (**LCOE 60 FCFA**). Le temps de retour sur investissement est pratiquement atteint au bout de 3 ans et 7 mois, pour un Bénéfice net sur 20 ans de **7 992 166 111 FCFA** ; en évaluant également 3,9t CO₂ préservé pendant les 20 ans correspondant à la durée de vie du projet ; nous pouvons se rassurer quand a la viabilité économique du projet car la rentabilité globale sur l'échéance du projet est supérieure aux investissements (en plus des charges d'exploitation).

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'objectif général de cette étude est de mettre en pratique le concept Nexus énergie- agriculture afin de placer l'agriculture au cœur de la transition énergétique, en trouvant de nouvelles solutions aux enjeux de demain et en développant des modèles vertueux de synergie de fonctionnement entre production agricole et production photovoltaïque tout en limitant l'un des points faibles de l'utilisation du solaire photovoltaïque à savoir une grande occupation des surfaces utiles et cultivables.

Au cours de ce travail nous a pu faire une étude technico-commerciale à travers les logiciels PVSyst 7.3.2 et RETScreen Expert où on a pu comparer le concept Agro-PV CPCL et le concept de central au sol photovoltaïque. Les résultats montrent que le coût d'investissement qui est de **2 563 094 113 FCFA** offre une économie et revenus annuels de **387 112 704 FCFA**, un TRI avant impôts-capitaux propres de **29,5%** et un retour sur les capitaux propres de **3,7 ans** sur une durée d'exploitation de la centrale de 20 ans avec un kilowattheure solaire de 60 FCFA. L'installation du concept Agro-PV CPCL permettra à la société de réaliser un gain de **7 992 166 111 FCFA** sur la durée de vie de la centrale d'une part tout en **sécurisant l'enceinte**. Le concept Agro-PV CPCL présente un rendement à l'hectare de 1,85 MW contre 0,53 MW/ha. Ce résultat offre ainsi de nouvelles opportunités en termes de gain de récolte et de surplus d'énergie pour les exploitations agricoles d'autre part. L'évaluation de la différence de rendement en termes de production d'énergie par surface occupée et du gain en surface permet de faire une économie en termes de production agricole de 1500 kg de noix de cajou par an correspondant à 30 Tonnes en 20 ans d'exploitation.

Au vu des résultats ainsi obtenus, nous pouvons dire que l'introduction du concept Agro-PV au niveau de l'agropole sud est un moyen efficace et efficient pour s'autonomiser en énergie solaire photovoltaïque avec un surplus d'énergie ; mais aussi l'énergie solaire PV peut contribuer fortement à l'indépendance énergétique dans le domaine de l'agro-industrie.

Ce travail nous a permis aussi de mettre en nouveau paramètre d'évaluation et de prise de décision appelé Rendement Agrivoltaïque, par analogie au paramètre agricole (le Rendement agricole à l'hectare), permettant d'évaluer l'impact d'une installation solaire sur la surface occupée et inutilisable par ailleurs.

Toutefois, même si les premiers résultats obtenus sont encourageants, nous pensons qu'il serait très intéressant d'utiliser ce concept Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire dans le domaine aérien, ferroviaire, etc. Le paramètre de Rendement Agrivoltaïque mis en œuvre lors de ce travail ouvre de larges perspectives. L'optimisation du concept Champ

Photovoltaïque Linéaire et Curviligne devra être poursuivie dans le but de développer une nouvelle génération de Centrale photovoltaïque beaucoup plus performantes et innovantes. D'un point de vue pratique, pour améliorer nos rendements obtenus il serait aussi nécessaire de mener une étude d'impact environnementale et sociale.

Références bibliographiques

- [1] LOUHOUNGHO, Ibrahima SY (2008). Caractérisation et typologie des exploitations agricoles familiales du Sénégal Tome 2 Sénégal Oriental et Haute Casamance
- [2] Sommaire du Rapport d'Évaluation du Marché Solaire Hors Réseau de Power Africa 2019
- [3] Plan d'Actions National des Energies Renouvelables (PANER) SENEGAL Période [2015-2020/2030]
- [4] Analyse de la concurrence entre les parcs photovoltaïques au sol et les autres usages des sols : Focus sur les solutions de l'agrivoltaïsme ; rapport Encis environnement
- [5] <https://energies-media.com/senegal-cent-solaires-mises-en-service-a-kael-et-kahone-vont-alim-pres-de-540-000-personnes-en-elect/> (consulté le 14 octobre 2022)
- [6] <https://www.actu-environnement.com/ae/news/centrales-photovoltaiques-sol-conflits-usage-defrichage-agriculture-acceptabilite-26602.php4> (consulté le 14 octobre 2022)
- [7] <https://www.colibri.solar/agriculteurs/ferme-solaire/> (consulté le 14 octobre 2022)
- [8] Les parcs solaires photovoltaïques au sol consomment-ils des terres agricoles ? SOLAGRO, pour Enercoop, Energie Partagée et Terre de liens, 2020
- [9] Francesco Frontini, SUPSI Mauro Caccivio, SUPSI Christian Renken, CRENERGIE SÀRL Guide des modules bifaciaux : Utilisation des modules solaires bifaciaux – possibilités d'application sur les bâtiments et dimensionnement des composants des installations
- [10] <https://www.renouvelle.be/fr/le-bifacial-vertical-dans-lagrivoltaïsme/> (consulté le 28 octobre 2023)
- [11] <https://www.lechodusolaire.fr/une-centrale-pv-de-2-mwc-voit-le-jour-avec-des-modules-en-montage-vertical/> (consulté le 07 décembre 2022)
- [12] <https://www.lechodusolaire.fr/lagriphotovoltaïque-cest-fantastique/> (consulté le 03 Janvier 2023)
- [13] <https://agrithermic.fr/fr/serre-photovoltaïque-appel-a-projet-dagrivoltaïsme/> (consulté le 03 Janvier 2023)
- [14] <https://www.baradel-paysage.com/serre-connectee-myfood/> (consulté le 03 Janvier 2023)
- [15] Potentiel photovoltaïque mobilisable sur Ombrières de parkings sur une commune du

Naturel Régional des Alpilles- Commune de Sénas ; Rapport d'étude mai 2019

[16] Sept ombrières-pilotes couvrant environ 5-6 ha chacune sont prévues par TSE-AgriPV en grandes cultures en France. Le site-pilote d'Amance vient d'être inauguré en Haute-Saône, les trois prochains à être lancés seront Brouchy, Souleuvre-en-Bocage et Verdonnet

[17] <https://region-sud.latribune.fr/innovation/2019-03-15/la-methode-d-ombrea-pour-gerer-sa-croissance-810913.html> (consulté le 23 février 2023)

[18] <https://www.paysan-breton.fr/2021/03/les-trackers-solaires-reserves-a-lautoconsommation-electrique/> (consulté le 23 février 2023)

[19] BONIFAZIO M (2008). Serres agricoles photovoltaïques : projet de développement agricole

[20] BONIFAZIO M (2008). Serres agricoles photovoltaïques : projet de développement agricole

[21] Alain MAUGUARD (2013). Systèmes photovoltaïques par modules rigides en toitures inclinées : Guide de conception, de mise en œuvre et de maintenance

[22] Sylvain DESEAU (2022). Le guide du solaire photovoltaïque dans le domaine agricole

[23] Calderon Perez, Idaly ; Hoyois, Sébastien (2021). "Etude technico-économique d'une installation photovoltaïque avec et sans batterie"

[24] Dupraz et al. (2011a,b). Associer panneaux solaires photovoltaïques et cultures vivrières pour optimiser l'utilisation des terres : vers de nouvelles filières agrivoltaïques

[25] Sekiyama et al. (2019). Partage solaire pour la production d'aliments et d'énergie propre : performances des systèmes agrovoltaïques pour le maïs, une culture typique intolérante à l'ombre

[26] Dinesh et Pearce (2016). Le potentiel des systèmes agrivoltaïque

[27] Sangik Lee et al (2013) Conception de systèmes agrivoltaïques pour la durabilité et l'agriculture intelligente : Aspects agronomiques et critères de conception avec évaluation de la sécurité

[28] **Diouma Kobor**, Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire (CPCL) pour l'Autonomie Énergétique des Sous-Stations/sous-centrales de Voies Ferrées en Afrique, de Stations de Recharges Ultra-rapides sur Autoroutes, des Aéroports et Fermes Agricoles, deposit under n° PV 1202200099 of 17/03/2022

[29] https://www.sunpalsys.com/2mw-bess-lithium-battery-renewable-energy-storage-systems_p261.html. (consulté le 30 Mars 2023)

[30] https://www.sunpalsys.com/lithium-ion-containerised-battery-backup-solar-pv-energy-storage-system_p285.html (consulté le 30 Mars 2023)

-
- [31] <https://www.groupe-cahors.com/fr-france/poste-de-transformation-et-de-livraison.html> (consulté le 30 Mars 2023)
- [32] Evaluation environnementale stratégique actualisée du Projet d’implantation d’une zone de transformation agro-Industrielle sud (pzta sud) ou agropole sud ; Version finale - Novembre 2020
- [33] <https://agropole.sn/service/agropole-sud/> (consulté le 17 avril 2023)
- [34] BRIDIER Manuel, et MICHAÏLOF Serge. 1995 (5e édition). Guide pratique d'analyse de projets. Paris : Economica
- [35] Révision des conditions tarifaires de Senelec 2020-2022. SENELEC
- [36] <https://www.l-expert-comptable.com/a/52676-le-retour-sur-investissement.html> (consulté le 30 avril 2023)
- [37] <https://www.lecfomasque.com/van-valeur-actuelle-nette-projet-investissement/> (consulté le 30 avril 2023)
- [38] <https://blog.nalo.fr/lexique/taux-de-rendement-interne-tri/> (consulté le 30 avril 2023)
- [39] Nicholas Dodd et al (2021). Level(s)- indicateur 6.1: coûts du cycle de vie Manuel d’utilisation: note d’information introductive, instructions et orientations (Version 1.1)
- [40] NERINCX, Quentin. Le financement des investissements liés à la performance énergétique des bâtiments et aux installations photovoltaïques
- [41] Analyse de projets d’énergie propres : manuel d’ingénierie et études de cas RETscreen » archive de publication du gouvernement du Canada 24 Février 2016
- [42] AFD Renforcer et moderniser le réseau électrique de la SENELEC.
- [43] Guide méthodologique pour la réalisation des bilans d’émissions de gaz à effet de serre des collectivités conformément à l’article L. 229-25 du code de l’environnement Version 3 Octobre 2016
- [44] Gestion des risques liés à un projet NF EN 62198

Annexes

Annexe 1 : Tableau 12: Tableau de dimensionnement de sections de câbles rigides utilisables

encc

TABLEAU DE DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DE CABLES *RIGIDES* UTILISABLE EN COURANT CONTINU

Tension nominale (V) : 48 Chute de tension maxi : 3,00% Température de l'ame : 60°C

Ampère \ Mètre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30	35	40	45	50
1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
3	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
7	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
8	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
10	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
11	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
12	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
13	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
14	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
15	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
16	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
17	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
18	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
19	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
20	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
25	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
30	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
35	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
40	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
45	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
50	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
60	2,5	4	6	10	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
70	2,5	4	6	10	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
80	2,5	4	6	10	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
90	4	6	10	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
100	4	6	10	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16

La section d'un conducteur est choisie en fonction d'un certain nombre de paramètres comme : la puissance (ou courant) à transporter ; la tension d'utilisation et la nature (cuivre ou autre métal) du conducteur. Cette section doit rester dans les limites des chutes de tension admissibles pour permettre d'assurer un fonctionnement optimal des récepteurs. D'où la nécessité d'utiliser l'abaque qui permettra de choisir la section convenable. Le tableau 12 illustre le dimensionnement de sections de câbles rigides utilisables en courant continu soit entre le champ PV et l'onduleur. Le tableau 13 illustre le dimensionnement de sections de câbles rigides utilisables en Courant Alternatif.

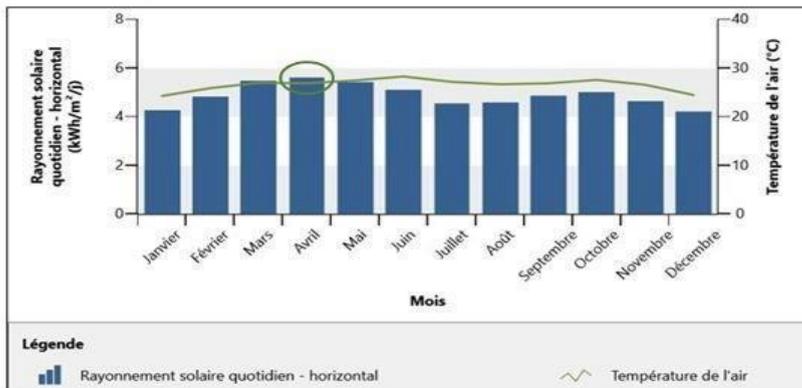
Annexe 2 : Tableau Error! Main Document Only : Tableau de dimensionnement de sections de câbles rigides utilisables en CA

P (kW)	I (A)	section (mm ²)												
		1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150
0,5	2,3	100	165	265	395									
1	4,6	60	84	135	200	335	530							
1,5	6,8	33	57	90	130	225	355	565						
2	9,1	25	43	68	100	170	285	430	595					
2,5	11,4	20	34	54	80	135	210	340	470	630				
3	13,6	17	29	45	66	110	180	285	395	520				
3,5	16	14	24	39	56	95	155	245	335	450				
4	18	11	21	34	49	84	135	210	295	395	580			
4,5	20	9	19	30	44	75	120	190	260	350	515			
5	23	8	17	27	39	68	105	170	235	315	460	630		
6	27	7	15	23	32	56	90	140	195	260	385	530		
7	32	6	13	20	28	48	76	120	170	225	330	460	570	
8	36	5	12	18	26	42	67	105	145	195	290	400	500	620
9	41	4	11	16	24	38	60	94	130	175	255	355	440	550
10	45	3	10	15	22	34	54	84	120	155	230	320	400	495
12	55	2	8	12	18	26	45	70	93	130	190	265	330	410
14	64	1	7	11	16	22	32	60	84	110	165	230	285	350
16	73	1	6	10	14	20	28	53	74	99	145	200	250	305
18	82	1	5	9	13	18	25	47	65	88	125	175	220	270
20	91	1	4	8	12	16	22	41	59	79	115	160	200	245
25	114	1	3	7	10	14	20	34	47	64	95	130	160	195
30	136	1	2	6	9	12	17	26	36	51	77	105	135	165
35	159	1	2	5	8	11	16	22	30	43	60	90	115	140
40	182	1	2	4	7	10	15	21	28	39	54	80	100	125
45	205	1	2	4	6	9	14	20	27	37	51	75	100	110
50	227	1	2	4	6	8	13	19	26	36	50	74	89	98

Annexe 3 : Localisation et rayonnement solaire quotidien Agropole Sud

Lieu	Unité	Lieu des données climatiques	Lieu des installations
Nom		Sénégal - Ziguinchor	Adéane
Latitude	'N	12,6	12,6
Longitude	'E	-16,3	-16,0
Zone climatique		0A - Extrêmement chaud - Humide	0A - Extrêmement chaud - Humide
Élévation	m	23	0

Données climatiques



	Température extérieure de calcul de chauffage	17,5							
	Température extérieure de calcul de climatisation	37,2							
	Amplitude des températures du sol	11,5							
Mois	Température de l'air °C	Humidité relative %	Précipitation mm	Rayonnement solaire quotidien - horizontal kWh/m ² /j	Pression atmosphérique kPa	Vitesse du vent m/s	Température du sol °C	Degrés-jours de chauffage °C·j	Degrés-jours de climatisation °C·j
Janvier	24,3	50,1%	2,66	4,28	100,9	1,9	27,3	0	443
Février	25,9	53,4%	1,43	4,84	100,8	2,2	28,5	0	445
Mars	27,0	56,1%	0,82	5,48	100,8	2,4	29,7	0	527
Avril	26,9	64,1%	1,09	5,63	100,7	2,5	30,9	0	507
Mai	27,5	70,0%	5,02	5,45	100,8	2,5	31,2	0	543
Juin	28,3	77,4%	112,31	5,11	101,0	2,3	29,9	0	549
Juillet	27,2	86,1%	292,35	4,57	101,0	1,7	27,5	0	533
Août	26,7	88,8%	399,15	4,59	101,0	1,5	26,9	0	518
Septembre	26,9	88,2%	312,96	4,88	100,9	1,2	27,1	0	507
Octobre	27,6	85,3%	137,26	5,01	100,9	1,0	27,6	0	546
Novembre	26,6	75,3%	8,77	4,64	100,9	1,1	29,3	0	498
Décembre	24,5	59,7%	2,68	4,21	100,9	1,6	28,0	0	450
Annuel	26,6	71,3%	1 276,49	4,89	100,9	1,8	28,6	0	6 065

Figure 29: Localisation et rayonnement solaire quotidien Agropole Sud

Annexe 4 : Etude de viabilité financière du Concept Agro-PV CPCL

Viabilité financière

Paramètres financiers

Taux d'inflation	%	2%
Durée de vie du projet	an	20
Ratio d'endettement	%	70%
Taux d'intérêt sur la dette	%	7%
Durée de l'emprunt	an	15

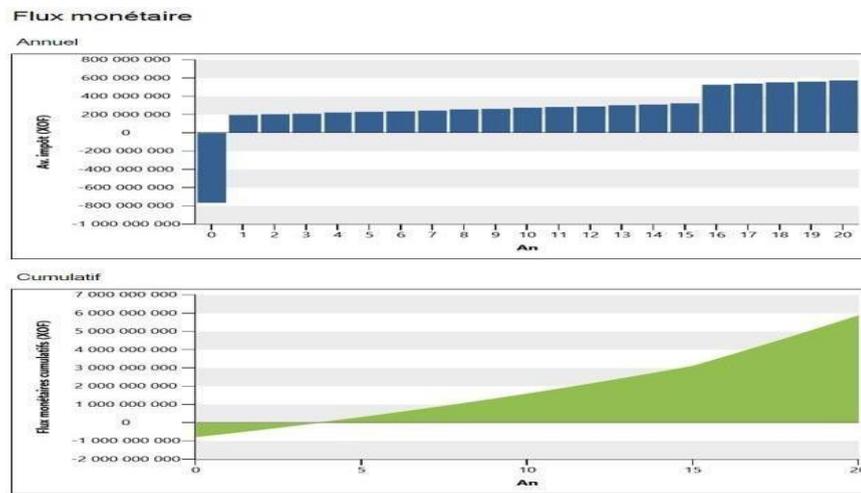
Coûts | Économies | Revenus

Coûts d'investissement			
Étude de faisabilité	1%	XOF	25 600 184
Développement	0,67%	XOF	17 208 900
Ingénierie	4,3%	XOF	109 879 565
Système de production d'électricité	85%	XOF	2 177 396 908
Infrastructures connexes et divers	9,1%	XOF	233 008 556
Total des coûts d'investissement	100%	XOF	2 563 094 113
Frais annuels et paiements de la dette			
Paiements de la dette - 15 ans		XOF	196 989 769
Total des frais annuels		XOF	196 989 769
Économies et revenus annuels			
Défini par l'utilisateur		XOF	387 112 704
Revenu d'exportation d'électricité		XOF	0
Total des économies et des revenus annuels		XOF	387 112 704

Viabilité financière

TRI avant impôt - capitaux propres	%	29,5%
TRI avant impôt - actifs	%	9%
Retour simple	an	6,6
Retour sur les capitaux propres	an	3,7

Figure 30.: Analyse des coûts Concept Agro-PV



Abonné : TEAM FFF 2016

Figure 31.: Analyse financière Concept Agro-PV