

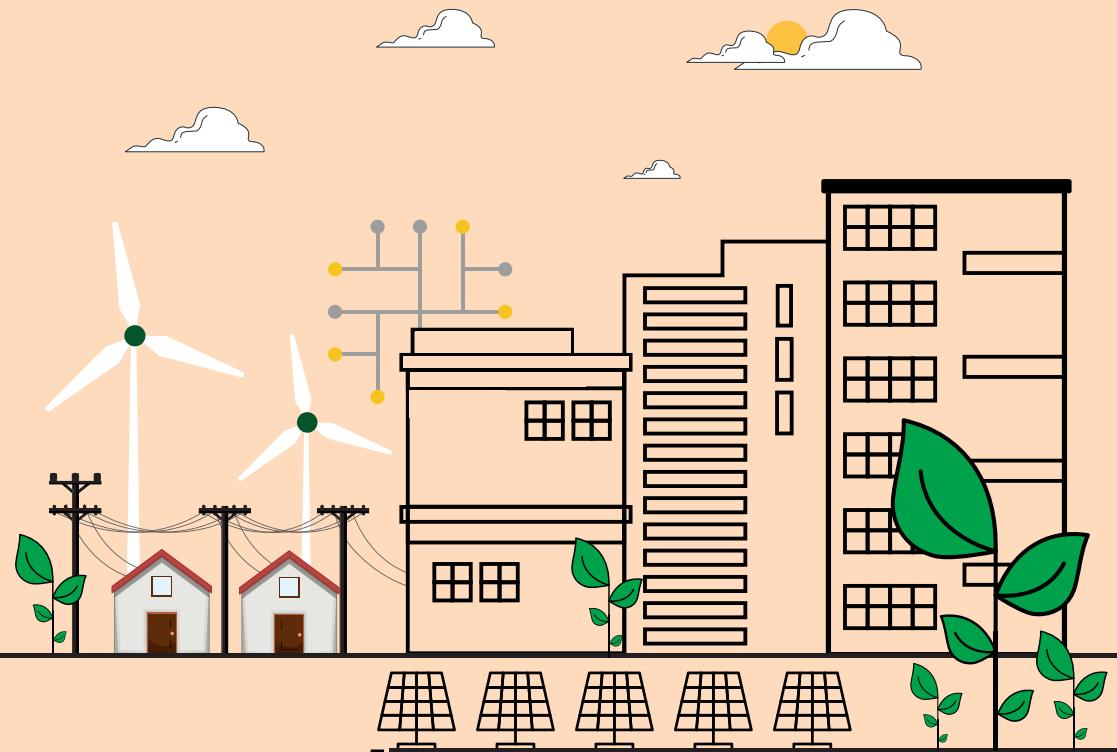
7.1

# Sunref

UN LABEL



AFD  
GROUPE



Étude sur

# L'AGRIVOLTAÏQUE

PROGRAMME D'ASSISTANCE TECHNIQUE POUR LA MISE EN ŒUVRE DES PROJETS  
SUNREF III – MAURICE

Développé par



Avec la participation  
financière de l'UE



En partenariat avec



Mis en oeuvre par





Depuis 2009, l'Agence française de développement (AFD) accompagne la transition de Maurice vers une économie bas carbone, résiliente au changement climatique et inclusive. Cet appui s'est d'abord illustré par deux premières lignes de crédit vertes, SUNREF I et SUNREF II. À ce titre, 100 M d'euros ont été déployés de 2009 à 2018, en partenariat principalement avec deux banques locales, la Mauritius Commercial Bank (MCB) et la SBM Bank (Mauritius) Ltd (SBM).



© Business Mauritius | Digital Kites



© Business Mauritius | Digital Kites

La troisième édition du programme (SUNREF Maurice) a été lancée en 2018 et est toujours en cours d'exécution. Il s'agit d'une ligne de crédit verte de 85 M€ mise à disposition du secteur privé (particuliers et entreprises) à travers trois banques locales : MCB, SBM et AfrAsia Bank Ltd. Des subventions à l'investissement au bénéfice des porteurs de projets vont de 5 à 16 % du montant du prêt éligible selon le type de projet (atténuation/adaptation/genre). L'Union européenne, partenaire clé du dispositif SUNREF Maurice, finance une partie des primes sur investissements - qui sont remises aux porteurs de projets éligibles, après vérification de l'installation effective des équipements - et l'assistance technique du programme.

En effet, outre le soutien financier, SUNREF Maurice propose un appui technique délégué à Business Mauritius, un acteur local majeur pour la promotion du développement économique, du capital social et de la croissance durable et inclusive pour la communauté des affaires.

SUNREF Maurice propose une approche intégrée, spécifique et innovante, combinant à la fois une offre financière dans des conditions attractives et une assistance technique dédiée aux développeurs. Le but est d'une part d'encourager les entreprises à acquérir des technologies et des équipements verts innovants et à adopter des modèles de développement plus durables, et d'autre part accroître leur compétitivité, améliorer leur image de marque et accéder à de nouveaux marchés.



# Avant-propos

## SUNREF Maurice innove pour mieux impacter



### Laetitia Habchi Directrice de l'Agence française de développement à Maurice

L'Agence française de développement (AFD) accompagne, depuis 2009, la transition de Maurice vers une économie bas carbone, résiliente au changement climatique et inclusive. À travers le troisième volet du programme SUNREF, l'AFD encourage la création d'une filière de la finance verte grâce à une ligne de crédit de 85 millions d'euros accordés aux banques partenaires, en l'occurrence la Mauritius Commercial Bank Ltd, la SBM Bank (Mauritius) Ltd et AfrAsia Bank Ltd.

**La dimension innovante de ce programme est son dispositif d'assistance technique** qui permet aux banques d'identifier des opportunités d'investissements dans les projets d'atténuation et d'adaptation au changement climatique, ainsi que ceux favorisant l'égalité professionnelle femmes/hommes.

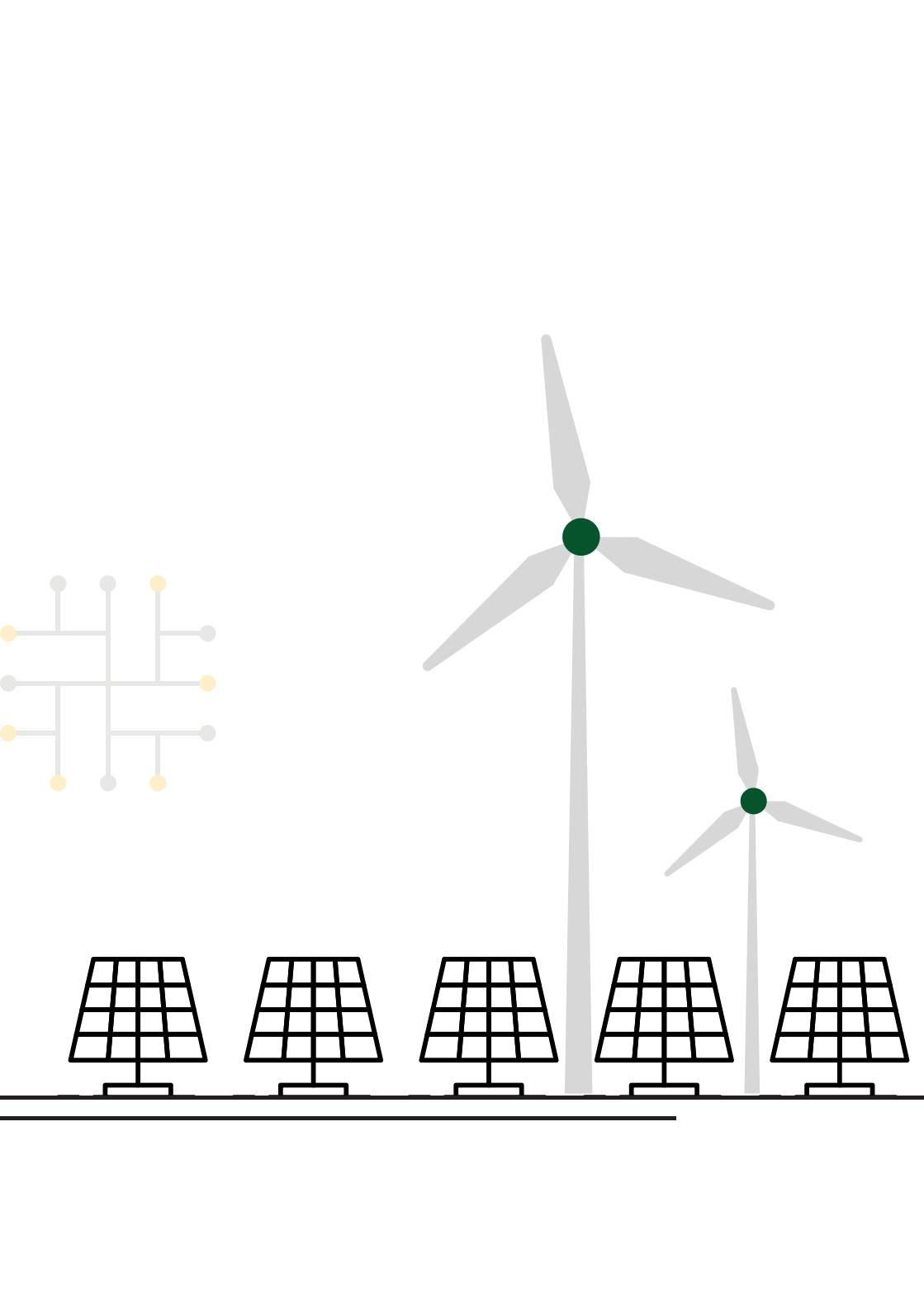
Elle sert également les entreprises à développer des projets verts éligibles, innovants et rentables en aidant à préparer les demandes de financement pour les banques partenaires. Le succès de SUNREF Maurice repose sur son offre intégrée qui propose, en sus des prêts à conditions préférentielles, des outils d'aide à la décision d'investissements.

À cet effet, un Fonds d'études SUNREF a été mis en place dans l'objectif de produire une collection documentaire comprenant, entre autres, des rapports techniques, analyses de projets pilotes et études de faisabilité, aux thématiques très variées et multisectorielles.

Cette série est donc une exploration de sujets appelés à revêtir une importance capitale pour Maurice. Parmi ceux-ci on compte la mobilité électrique, la construction durable, les risques financiers climatiques, la gestion des effluents liquides dans l'industrie, l'impact du Pacte vert européen sur l'économie mauricienne, le potentiel de solutions durables comme l'hydrogène vert, l'agri-solaire, étude des mécanismes de la finance carbone et les opportunités ouvertes.

Cette collection est le fruit d'un travail de longue haleine et a pour objectif un partage d'expérience entre ceux qui souhaitent agir pour un développement soutenable de l'économie et contribuer à une transition plus juste de la société.

Par la présente, je voudrais féliciter l'équipe de l'assistance technique, notamment Business Mauritius, et les partenaires qui ont contribué à la réalisation de ces études et à leur publication. Je tiens également à exprimer ma gratitude vis-à-vis de l'Union européenne qui a permis le financement de ce fonds. Alors que nous entrons dans une nouvelle ère pour la finance durable, nous continuerons à œuvrer pour explorer de nouvelles méthodes et faire émerger des projets à faible impact pour Maurice.





# TABLE DES MATIÈRES

- 09** Résumé exécutif
  - 10** Objectifs de l'étude sur l'Agrivoltaïque à l'île Maurice
  - 11 - 13** Principales conclusions et recommandations
  - 14** Introduction
  - 15 - 21** Aperçu de l'agrivoltaïque
  - 22 - 23** Analyse agricole
  - 24 - 29** Analyse Économique
  - 30 - 31** Définition et cadre juridique de l'agrivoltaïque
  - 32 - 37** Annexes
-

# Abréviations

AMB	Agricultural Marketing Board ( <i>Conseil de commercialisation des produits agricoles</i> )
BIPV	Photovoltaïque Intégré au Bâtiment ( <i>Building Integrated Photovoltaics</i> )
BOS	Équilibre du Système ( <i>Balance of System</i> )
CEB	Central Electricity Board
CPV	Photovoltaïque à Concentration ( <i>Concentrating Photovoltaics</i> )
C-Si	Silicium cristallin
EPBT	Temps de Retour Énergétique ( <i>Energy Payback Time</i> )
UE	Union européenne
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture ( <i>Food and Agricultural Organization of the United Nations</i> )
FAREI	Food and Agricultural Research and Extension Institute
GCR	Taux de recouvrement des sols ( <i>Ground Cover Ratio</i> )
PIB	Produit intérieur brut
GHI	Irradiation horizontale globale ( <i>Global Horizontal Irradiation</i> )
GM-PV	Ground-mounted PV
	Photovoltaïque au Sol (PVS)
GWc	Gigawatts crête
AIE	Agence Internationale de l'Énergie
IPP	Producteurs d'électricité indépendants ( <i>Independent Power Producers</i> )
km	Kilomètres
ACV	Analyse du Cycle de Vie
LCOE	Coût Actualisé de l'énergie ( <i>Levelized Cost of Electricity</i> )
RET	Rapport équivalent des terres
LSC	Concentrateur solaire luminescent ( <i>Luminescent Solar Collector</i> )
Mm <sup>3</sup>	Mégamètres cubes
mono-Si	Silicium monocristallin
MSDG	Medium Scale Distributed Generator ( <i>production distribuée à moyenne échelle</i> )
multi-Si	Silicium multicristallin
MWc	Mégawatts crêtes
CDN	Contributions déterminées au niveau national
OPV	Cellules Photovoltaïques Organiques ( <i>Organic Solar Cells</i> )
PV	Photovoltaïque
SFWF	Small Farmers Welfare Funds
PEID	Petits États Insulaires en Développement
SSDG	Small-Scale Distributed Generators
ATE	Approvisionnement Total en Énergie

# I. Résumé exécutif

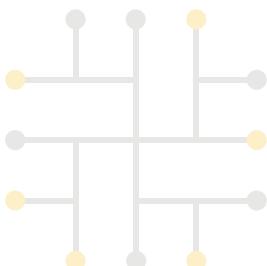
Cette étude examine le potentiel de l'agrivoltaïque comme solution multifonctionnelle pour relever les défis auxquels l'île Maurice est confrontée, en particulier l'intensification des événements météorologiques extrêmes, la montée du niveau de la mer et la diminution de la productivité agricole. Avec des objectifs ambitieux visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40 % et à augmenter la production d'énergies renouvelables pour atteindre 60 % d'ici 2030, l'île Maurice cherche à exploiter l'agrivoltaïque pour optimiser l'utilisation des terres, renforcer la résilience de l'agriculture et soutenir la production d'énergie durable.

L'agrivoltaïque repose sur un principe de double utilisation des terres, permettant à la fois la production d'électricité et la production agricole. L'installation de modules photovoltaïques (PV) sur des terres agricoles peut considérablement améliorer l'efficacité de l'utilisation des sols, jusqu'à 84 %, tout en offrant divers avantages tels que l'ombrage des cultures, l'amélioration de l'électrification rurale et la diversification des sources de revenus pour les agriculteurs. De plus, les systèmes agrivoltaïques peuvent favoriser la collecte des eaux pluviales, atténuer l'épuisement des nappes phréatiques tout en réduisant le stress thermique et l'évapotranspiration, permettant ainsi des économies d'eau d'irrigation pouvant atteindre 20 %.

À l'échelle internationale, l'agrivoltaïque s'est rapidement développée, avec des installations significatives en Chine, au Japon, en France et aux États-Unis. Ces systèmes ont démontré une augmentation de la productivité des terres, certaines études rapportant des gains allant jusqu'à 73 %, et offrent divers avantages supplémentaires, tels que la réduction du coût actualisé de l'électricité, la diversification des revenus pour les agriculteurs, et une meilleure résilience face aux événements météorologiques extrêmes.

À l'île Maurice, où l'agriculture est essentielle à la sécurité alimentaire et à la stabilité économique, l'agrivoltaïque représente une opportunité de renforcer la résilience agricole, de diminuer la dépendance aux importations alimentaires, et de contribuer à l'autosuffisance énergétique. Les conditions climatiques favorables, la disponibilité des terres et les objectifs en matière d'énergie renouvelable de l'île constituent un environnement favorable au déploiement de systèmes agrivoltaïques.

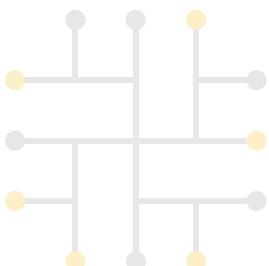
L'étude aborde également la nécessité d'un cadre juridique solide pour distinguer l'agrivoltaïque des autres projets photovoltaïques, conformément aux meilleures pratiques internationales, dans le but de protéger les terres agricoles et les activités agricoles existantes, tout en encourageant la double utilisation des terres.



## 2. Objectifs de l'étude sur l'Agrivoltaïque à l'île Maurice

Les objectifs de cette étude étaient les suivants :

- Concevoir un système agrivoltaïque performant en **combinant énergie solaire et culture agricole**, tout en identifiant les obstacles potentiels.
- Réaliser une **analyse agricole**, incluant l'évaluation de la compatibilité et des exigences des différentes cultures dans la région cible, ainsi que l'analyse des pratiques agricoles actuelles et futures.
- Évaluer des facteurs tels que l'impact de la crise climatique sur la sélection des cultures, les **tolérances à l'ombrage**, les synergies possibles avec l'agrivoltaïque, l'**adéquation des sites**, le potentiel d'exportation et les **enjeux de sécurité alimentaire**.
- Explorer différents concepts **de gestion de l'eau**, en tenant compte des conditions locales et des exigences opérationnelles du système.
- Sélectionner des technologies de capteurs de **surveillance** adaptées aux besoins du site.
- Développer un **protocole de test** détaillé **pour les cultures** identifiées comme appropriées lors de l'analyse agricole.
- Élaborer une **demande de proposition (RFP)** définissant le cadre technique de la solution agrivoltaïque la plus adéquate.
- Mettre en place un **outil de calcul des coûts** et réaliser une **analyse économique**.



### 3. Principales conclusions et recommandations

**1 Exigences légales :** À ce jour, le cadre juridique mauricien ne dispose pas d'une définition adéquate de l'agrivoltaïque. Il est donc recommandé d'adopter une définition légale dans le contexte mauricien (Sugar Industry Efficiency Act ou loi sur l'efficacité de l'industrie sucrière) comme suit : « Installation solaire sur des terres agricoles utilisées principalement pour la production agricole et secondairement pour la production d'électricité ». Il est également suggéré d'intégrer les critères d'éligibilité dans l'article 28 du Sugar Industry Efficiency Act, comme détaillés dans la section 8 ci-après.

**2 Sélection des cultures :** Il est essentiel d'identifier les cultures adaptées aux systèmes agrivoltaïques à l'île Maurice, en tenant compte de facteurs tels que la tolérance à l'ombre, la viabilité économique et la demande du marché. L'accent doit être mis à la fois sur les cultures vivrières et non vivrières pour optimiser les bénéfices agricoles et économiques.

a. **Cultures non vivrières :** bien que la canne à sucre soit la culture prédominante à l'île Maurice, ses besoins en plein soleil, sa hauteur et ses exigences en matière de mécanisation peuvent compromettre une mise en œuvre économiquement viable dans un système agrivoltaïque. Le thé, grâce à sa tolérance à l'ombre, de sa culture nécessitant une main-d'œuvre importante, et de ses succès internationaux, notamment au Japon, présente un potentiel intéressant pour l'agrivoltaïque. Toutefois, sa culture dans la partie centrale très humide de l'île Maurice pourrait entraîner un rendement électrique comparativement plus faible.

b. **Cultures vivrières :** Les principales cultures vivrières produites en quantité à l'île Maurice sont la pomme de terre, la banane, la citrouille, l'oignon, la tomate, le chou, la calebasse, l'ananas, le concombre et la carotte. Des études ont montré qu'un taux d'ombrage de 25 à 35 % semble bénéfique pour le rendement des tomates, réduisant ainsi les brûlures dues au soleil et la fissuration des fruits. Pour les concombres, l'ombrage peut être avantageux, bien que l'on ait observé une augmentation proportionnelle de la biomasse des feuilles et des tiges par rapport aux fruits récoltables. Les autres cultures étudiées dans cette analyse incluent la pomme de terre, l'oignon, la carotte, les légumes verts à feuilles, les herbes aromatiques, le gingembre, la banane et l'ananas.

c. **Catégories de cultures :** La conception des systèmes agrivoltaïques est complexe et influencée par les facteurs environnementaux locaux, les types de cultures, les pratiques agricoles et les contextes socio-économiques. Dans le cas des systèmes PV au sol avec espacement, l'écart entre les rangées est crucial pour garantir un espace suffisant pour les activités agricoles et éviter que les modules photovoltaïques ne soient ombragés. Les systèmes surélevés, quant à eux, doivent être disposés de manière à optimiser l'ensoleillement des cultures sous-jacentes, en tenant compte du rayonnement solaire et de la tolérance à l'ombre des cultures. En fonction des différents types de systèmes agrivoltaïques, les cultures peuvent être catégorisées comme suit :

i. **Groupe I :** ce groupe comprend les cultures horticoles tolérantes à l'ombre telles que les légumes verts à feuilles, certaines cultures racines, les cultures à haute valeur ajoutée et les petits arbres fruitiers qui bénéficient d'une protection supplémentaire apportée par les modules photovoltaïques. Pour ce groupe, les systèmes agrivoltaïques surélevés sont jugés appropriés.

ii. Groupe II : ce groupe inclut les cultures moins tolérantes à l'ombre, notamment certaines plantes en C4 (utilisant la photosynthèse) comme le maïs, la canne à sucre et le sorgho. La double utilisation des terres engendrera une augmentation continue de la productivité globale du terrain. Ainsi, des systèmes photovoltaïques avec espacement inter-rangées et verticaux peuvent être envisagés, ce qui se traduira par un CAPEX (dépenses d'investissement) inférieur.

d. **Serres photovoltaïques** : Les serres peuvent être associées à la production d'électricité photovoltaïque, soit par l'ajout de modules photovoltaïques, soit par l'installation de nouvelles structures. Le schéma en damier (placement des modules PV en alternance) peut être utilisé pour améliorer l'homogénéité de la lumière par rapport à des conditions d'éclairage direct, optimisant ainsi les conditions de croissance des cultures.

La sécurité alimentaire constitue une priorité absolue. Cela peut être vérifié au moyen de preuves de ventes de produits à base d'agar, d'achats de semences (ou de jeunes animaux) ou de visites d'inspection inopinées.

**3 Gestion de l'eau** : L'analyse des régimes de précipitations dans les différentes régions de l'île met en évidence le potentiel variable de la collecte des eaux de pluie. Les zones côtières reçoivent généralement moins de précipitations que les régions intérieures, compte tenu des hauts plateaux, en particulier les régions centrales et au sud-Ouest de l'île, étant identifiées comme des sites attractifs pour la mise en œuvre de systèmes intégrés d'agrivoltaïsme et de collecte des eaux pluviales, qui devrait être une considération importante lors de la mise en œuvre de systèmes agrivoltaïques.

**4 Conception du système** : Il est essentiel d'évaluer soigneusement les types de systèmes et leurs configurations afin d'optimiser la production d'énergie et le rendement des cultures tout en minimisant les interférences avec les activités agricoles. Il faut tenir compte de facteurs tels que l'angle d'inclinaison des modules, la hauteur des structures, la distance entre les rangées et l'orientation générale du système.

a. Deux conceptions de systèmes ont été sélectionnées pour des d'essai : l'une avec une configuration de toit orienté est-ouest et l'autre avec un système à suiveur solaire, sur deux sites différents, l'un sur la côte ouest, près de Port-Louis, et l'autre sur les hauts plateaux.

b. Les résultats de la simulation montrent que la capacité installée et la production d'énergie sont plus élevées avec le système fixe qu'avec le système à trackers.

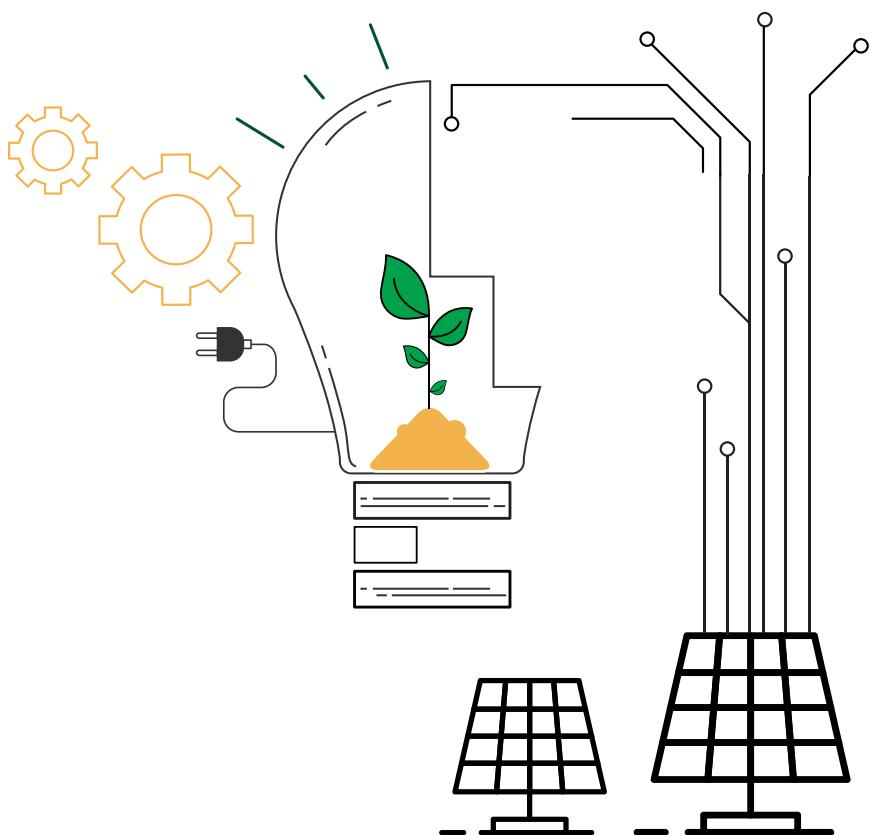
**5 Analyse coûts-bénéfices** : Il est recommandé de réaliser une évaluation approfondie des coûts et des bénéfices associés à la mise en œuvre de l'agrivoltaïque, en tenant compte de facteurs tels que les dépenses d'investissement, le potentiel de production d'énergie, la productivité agricole et la durabilité à long terme.

**6 Recherche et collaboration** : Encourager la collaboration entre les agences gouvernementales, les entités du secteur privé, les institutions académiques et les communautés locales pour développer et mettre en œuvre des projets agrivoltaïques de manière efficace. Investir dans la recherche pour répondre aux incertitudes concernant la réaction des cultures face au climat spécifique de l'île Maurice.

7 **Politiques de soutien** : Développer des politiques de soutien et des incitations pour encourager l'adoption de l'agrivoltaïque, y compris des processus d'autorisation rationalisés, des incitations financières et des subventions pour les agriculteurs et les développeurs. Veiller à ce que les cadres réglementaires facilitent le déploiement des systèmes agrivoltaïques. Tous les programmes de soutien doivent être transparents et prévisibles. Des campagnes de communication peuvent favoriser leur acceptation.

8 **Incitations** : L'analyse économique montre que les systèmes agrivoltaïques plus coûteux ne sont pas rentables à l'île Maurice sans soutien financier. Les multiples avantages pour la sécurité alimentaire, la production d'énergie solaire et la biodiversité justifient le soutien financier de l'État. Les systèmes agrivoltaïques de plus grande taille ont un coût spécifique plus faible. Il est donc recommandé d'accorder des tarifs progressifs en fonction des catégories de performance. Les tarifs devraient être ajustés régulièrement pour refléter les changements du marché.

En conclusion, l'agrivoltaïque offre une voie prometteuse pour relever les défis interconnectés du changement climatique, de l'agriculture et de l'énergie à l'île Maurice. Grâce à une planification stratégique, à des investissements et à l'engagement de parties prenantes, l'agrivoltaïque peut contribuer de manière significative au développement durable, au renforcement de la résilience et à la prospérité économique du pays.



## 4. INTRODUCTION

L'île Maurice est particulièrement vulnérable aux effets du changement climatique, notamment sur des aspects essentiels tels que l'agriculture, les ressources en eau, l'environnement marin, la pêche et les zones côtières fortement menacés. De plus, la fréquence des tempêtes d'une intensité comparable à celle des cyclones tropicaux a augmenté. Ainsi, conformément à ses Contributions Déterminées au niveau National (CDN) mises à jour, visant à réduire ses émissions nationales et à s'adapter au changement climatique, l'île Maurice s'engage à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 40 % et à augmenter sa production d'énergie à partir de sources renouvelables jusqu'à 60 % d'ici 2030. Cela inclut également l'élimination progressive du charbon et l'amélioration de l'efficacité énergétique de 10 % (base de référence : 2019). Pour atteindre cet objectif de 60 % d'ici 2030, le Central Electricity Board (CEB) a lancé plusieurs programmes d'énergie renouvelable et appels d'offres, qui devraient permettre la création d'environ 7 000 emplois verts.

En outre, l'île Maurice est un importateur net de denrées alimentaires, qui dépend des importations pour la majorité de ses aliments de base (notamment la farine de blé et le riz) et qui importe environ 77 % de ses besoins alimentaires totaux. Bien qu'environ 40 % de la surface du pays soit consacrée à l'agriculture, près de 90 % des terres cultivées sont dédiées à la culture de la canne à sucre, qui constitue la principale source de revenus d'exportation. Dans le cadre de la diversification au-delà de la canne à sucre, dont les surfaces cultivées diminuent constamment depuis 2016, et pour renforcer la souveraineté et la sécurité alimentaires du pays, le gouvernement mauricien promeut l'autosuffisance dans les denrées alimentaires pouvant être produites localement.

Pour relever les défis interdépendants du changement climatique, de l'agriculture et des ressources foncières limitées à l'île Maurice, l'agrivoltaïque constitue une solution potentielle. Cette approche permet une double utilisation des terres en installant des modules photovoltaïques au-dessus des terres agricoles, générant ainsi de l'électricité tout en cultivant. La mise en oeuvre de l'agrivoltaïque peut offrir de nombreux avantages, notamment une utilisation plus efficiente des terres (jusqu'à 84 % selon les cultures), des effets d'ombrage bénéfiques et une amélioration de l'électrification rurale. Il s'agit d'une méthode économiquement viable pour accroître la productivité des terres, renforcer la résilience de l'agriculture face aux phénomènes météorologiques extrêmes et faciliter la production d'électricité durable à partir de sources renouvelables, réduisant ainsi la dépendance à l'égard des combustibles fossiles. De plus, l'agrivoltaïque permet aux agriculteurs de diversifier leurs revenus grâce à la production simultanée d'électricité et de cultures. Ces systèmes permettent également d'intégrer la collecte des eaux pluviales, atténuant ainsi l'épuisement des nappes phréatiques. L'ombrage créé par les modules photovoltaïques réduit le stress thermique et l'évapotranspiration, permettant ainsi des économies d'eau d'irrigation pouvant atteindre 20 %, un enjeu qui sera de plus en plus crucial à l'avenir. Compte tenu des divers avantages de l'agrivoltaïque, la mise en oeuvre de ces systèmes présente un potentiel significatif.

Ce rapport vise à analyser la proposition de mise en oeuvre de l'agrivoltaïque à l'île Maurice. Il examinera le potentiel de l'agrivoltaïque pour l'optimisation de l'utilisation des terres et la production d'électricité, en tenant compte des zones climatiques du pays, des pratiques et conditions agricoles, ainsi que de l'état actuel de la technologie photovoltaïque. Les cultures adaptées à l'agriculture mauricienne seront identifiées, et les types de systèmes et technologies agrivoltaïques envisageables, ainsi que leurs coûts, seront présentés.

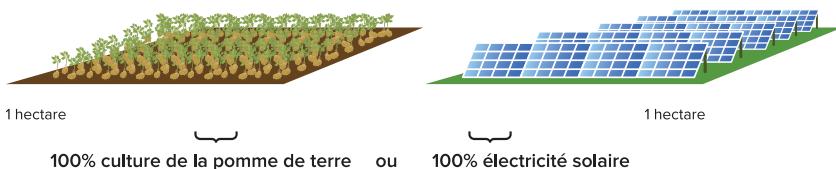
## 5. Aperçu de l'agrivoltaïque

### 5.1 Développement de l'agrivoltaïque et efficacité d'utilisation des terres

Pour répondre aux conflits d'intérêts liés à l'utilisation des terres, l'agrivoltaïque, qui combine la production alimentaire et la production d'électricité sur les mêmes parcelles, offre non seulement l'avantage d'un système à utilisation multiple des terres, mais crée un environnement capable d'améliorer les performances des deux systèmes (réduction des pertes en eau grâce à une baisse de la température des panneaux, tout en protégeant la biomasse contre les conditions environnementales difficiles) lorsqu'il est conçu manière optimale.

Utilisation séparée des terres sur 1 hectare de terres cultivées :

100 % de pommes de terre ou 100 % d'électricité solaire



Utilisation combinée des terres sur 1 hectare de terres cultivées :

186 % d'efficacité dans l'utilisation des terres

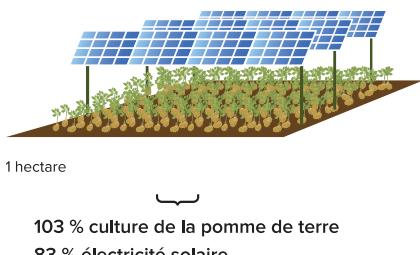


Schéma 1: Illustration de l'augmentation de l'efficacité de l'utilisation des terres.

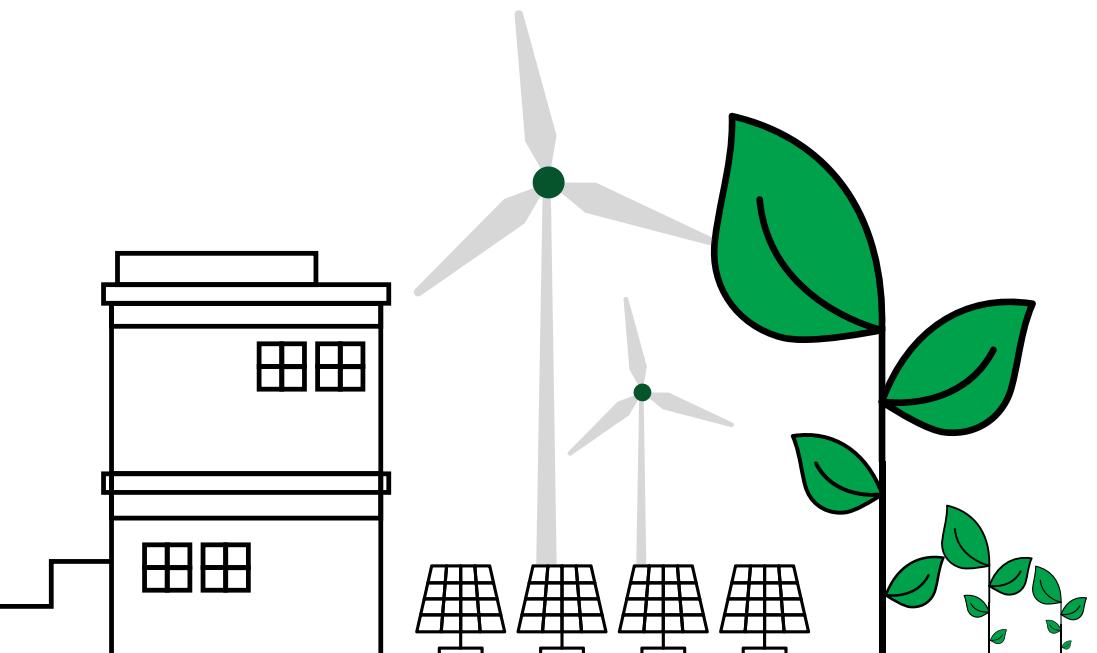
### 5.2 Développement international

Le développement de la technologie agrivoltaïque au cours des dernières années a été extrêmement dynamique. Aujourd'hui, elle est présente dans presque toutes les régions du monde, avec une capacité installée qui a augmenté de manière exponentielle, passant d'environ 5 mégawatts crête (MWp) en 2012 à au moins 14 gigawatts crête (GWp) en 2021. Ce progrès a été rendu possible grâce à des programmes de financement gouvernementaux au Japon (depuis 2013), en Chine (vers 2014), en France (depuis 2017), aux États-Unis (depuis 2018) et, plus récemment, en Corée. Entre 2017 - 2018, la Chine, leader mondial des installations agrivoltaïques, a mis en service 1,7 GWc de systèmes agrivoltaïques, incluant plusieurs installations à grande échelle pour les services publics. À l'exception de ces grandes centrales électriques, l'agrivoltaïque s'est principalement développée à plus petite échelle, avec des installations allant jusqu'à 2 MWc, et rarement au-delà de 5 MWc.

Pays	Capacité Installée	Tendance	Remarques
Chine	> 2 GWp	incertain, diminution du rythme d'installation à partir de 2018.	Les connaissances et l'expérience acquises grâce aux installations photovoltaïques à grande échelle en Chine ne sont pas suffisamment diffusées au sein de l'industrie et des universitaires d'Asie du Sud et d'Occident.
Japon	> 200 MWp	en augmentation	La nouvelle politique permet un traitement préférentiel du «partage solaire», sans qu'un minimum d'autoconsommation soit requis pour bénéficier du tarif de rachat de l'électricité photovoltaïque (PV FiT).
France	15 – 30 MWp	en augmentation	La consommation d'au moins 120 MWp a débuté entre 2021 et 2022.
Allemagne	10 – 15 MWp	en augmentation	L'agrivoltaïque sera probablement incluse dans les appels d'offres étant donné que la nouvelle politique en matière d'énergie renouvelable est en cours de négociation.
Italie	> 8 MWp	en augmentation	Dont 6,7 MWp de systèmes agrivoltaïques de suivi à deux axes par RemTec.
États-Unis	> 5MWp	en augmentation	Un nouveau système agrivoltaique d'un mégawatt est en cours d'installation dans le Massachusetts, et les États américains tels que l'Arizona et la Californie manifestent un grand intérêt pour ces technologies.
Inde	6 MWp	en augmentation	Vaste programme de développement de l'énergie solaire dans le secteur agricole pouvant inclure des dispositions relatives à l'agrivoltaïque.
Corée du Sud	2 MWp	en augmentation	Nouvelle politique de soutien aux agriculteurs en matière d'agrivoltaïque et enseignements tirés de la politique japonaise. 19 sites de démonstration d'une puissance maximale de 100kWp.
Amérique du Sud	> 100kWp	en augmentation	Initiatives au Chili et au Brésil.
Afrique	n.a.	en augmentation	Des démonstrateurs sont prévus en Algérie, au Mali, en Gambie ainsi qu'au Kenya et en Ouganda.

### 5.3 Facteurs justifiant le déploiement de l'agrivoltaïque à l'île Maurice

L'agrivoltaïque, y compris les serres photovoltaïques, offre une solution pour atténuer les effets du changement climatique tout en renforçant la productivité agricole et la résilience économique à l'île Maurice. L'objectif de l'agrivoltaïque est d'augmenter l'efficacité de l'utilisation des terres tout en répondant aux enjeux du lien entre l'eau, l'énergie et l'alimentation. Les modules photovoltaïques peuvent apporter un ombrage et une protection physique précieux pour l'agriculture mauricienne, particulièrement dans le contexte de la diminution des précipitations et de l'imprévisibilité des régimes pluviométriques. Ces systèmes contribuent à réduire l'évapotranspiration, à maintenir l'humidité du sol, et à faciliter la collecte des eaux de pluie, ce qui améliore l'irrigation des cultures et favorise la conservation de l'eau. De plus, les modules photovoltaïques peuvent améliorer les conditions de croissance des cultures en modérant les températures et en réduisant le stress hydrique grâce à l'ombrage, ce qui peut se traduire par une augmentation des rendements et une amélioration de la qualité des cultures. Par ailleurs, l'agrivoltaïque peut offrir aux petits exploitants agricoles des sources supplémentaires de revenus réguliers, contribuant ainsi à la résilience économique et à la création de valeur ajoutée dans les zones rurales. Les systèmes agrivoltaïques intégrés génèrent de l'énergie sans émission de carbone, soutenant ainsi les efforts d'atténuation tout en facilitant l'adaptation aux conditions climatiques à l'île Maurice.



## 5.4 Types et principales caractéristiques des systèmes agrivoltaïques

La conception d'un système agrivoltaïque est influencée par les conditions environnementales et climatiques locales, les types de cultures, les systèmes agricoles ainsi que les conditions socio-économiques. Généralement, les systèmes agrivoltaïques se divisent en deux catégories : les systèmes surélevés, où les modules sont installés en hauteur, au-dessus des cultures, et les systèmes avec espacement inter-rangées, où les zones d'activités agricoles se déroulent entre les rangées de modules photovoltaïques. Par ailleurs, les serres peuvent être modernisées en y intégrant des modules PV, ou de nouvelles structures de serres photovoltaïques peuvent être construites.

### 5.4.1 Systèmes agrivoltaïques surélevés

Pour les systèmes surélevés, la disposition des modules photovoltaïques doit être optimisée afin de permettre une pénétration suffisante de la lumière du soleil vers les cultures sous-jacentes. La configuration optimale des modules PV dans un système agrivoltaïque dépend de la quantité de rayonnement solaire sur le site et de la tolérance des cultures à l'ombre.

Le schéma 2 présente les systèmes surélevés possibles pour l'île Maurice.

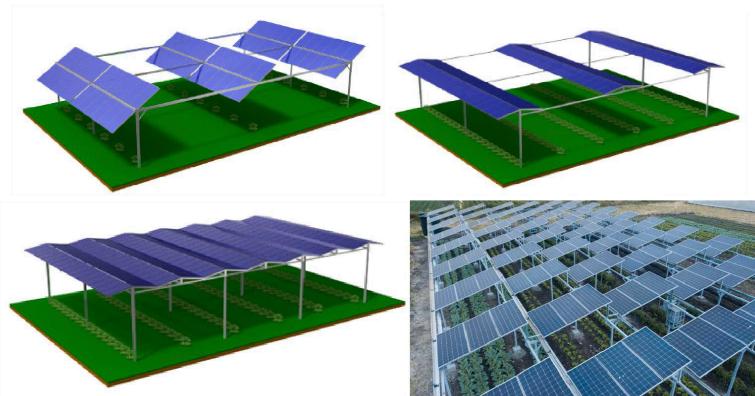


Schéma 2 : Plusieurs modèles et concepts d'installations photovoltaïques surélevées.

#### 5.4.2 Systèmes agrivoltaïques au sol avec espacement inter-rangées

Les systèmes agrivoltaïques au sol avec espacement inter-rangées intègrent l'agriculture entre les rangées de modules photovoltaïques (schéma 3). Contrairement aux systèmes photovoltaïques surélevés, les systèmes au sol disposent d'une hauteur de dégagement limitée, ce qui restreint l'utilisation des machines agricoles aux espaces situés entre les rangées de modules, généralement espacées de 6 à 15 mètres. Cette distance varie en fonction de la hauteur des rangées et de l'espace disponible.

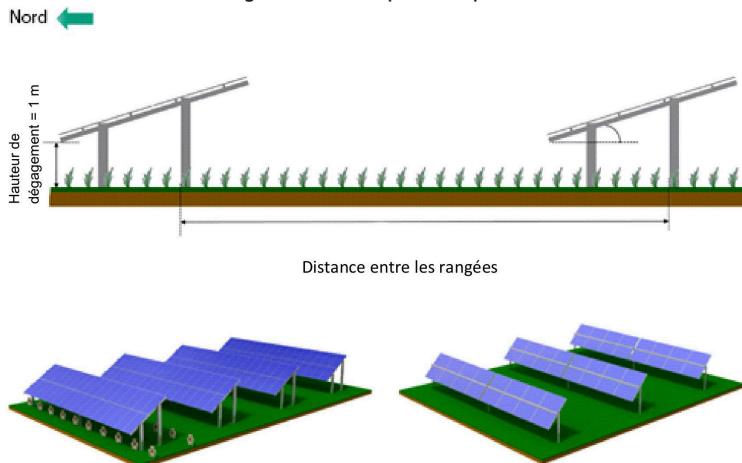


Schéma 3 : Systèmes agrivoltaïques au sol avec espacement inter-rangées adapté pour la mécanisation agricole.

Les systèmes agrivoltaïques verticaux, une forme spécialisée d'agrivoltaïque au sol avec espacement inter-rangées, est constitué de modules bifaciaux orientés est-ouest, produisant de l'électricité principalement le matin et le soir (Schéma 4). Bien que la répartition inégale de la lumière puisse entraîner une croissance hétérogène des cultures, les systèmes avec espacement inter-rangées peuvent également servir de brise-vent dans les zones venteuses, ce qui peut potentiellement réduire l'érosion du sol et l'évapotranspiration.

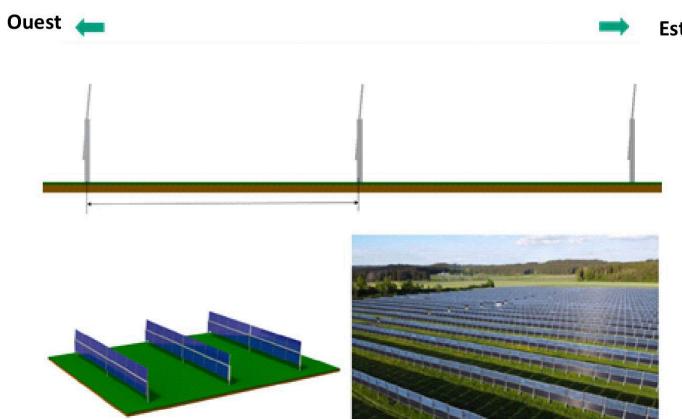


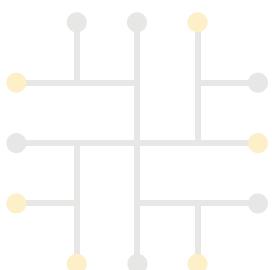
Schéma 4 : Systèmes photovoltaïques verticaux au sol et installation verticale de 4,1 MWc à Donaueschingen-Aasen.

### 5.4.3 Serres photovoltaïque

Les serres sont généralement construites dans des endroits ensoleillés sur des champs ouverts, car la lumière du soleil est cruciale pour la photosynthèse des cultures. Ces emplacements sont également idéaux pour la production d'électricité photovoltaïque. L'intégration de serres et de systèmes photovoltaïques sur une même unité foncière offre la possibilité de développer un système de production végétale innovant et économique en énergie (schéma 5). Cependant, il est important de trouver un équilibre délicat entre les cultures et la production d'électricité photovoltaïque afin d'exploiter efficacement la lumière du soleil à la fois pour la croissance des cultures et pour la production d'électricité.



Schéma 5 : Serre photovoltaïque



#### 5.4.4 Collecte des eaux pluviales

L'intégration d'un système de collecte des eaux pluviales aux systèmes agrivoltaïques offre un potentiel considérable pour renforcer la durabilité de l'agriculture, atténuer les risques de pénurie d'eau et contribuer aux objectifs globaux de sécurité en matière d'eau, d'énergie et d'alimentation à l'île Maurice.

Cela peut également être perçu comme une solution durable pour répondre aux défis de pénurie d'eau auxquels sont confrontés les petits exploitants agricoles mauriciens. La dépendance de l'île à des précipitations intermittentes et imprévisibles nécessite des approches innovantes pour améliorer la productivité agricole. Les systèmes agrivoltaïques, qui utilisent l'énergie solaire pour l'irrigation, combinés à la collecte des eaux de pluie, offrent une stratégie prometteuse pour augmenter les rendements agricoles, réduire la dépendance aux sources d'eau naturelles et prévenir l'érosion des sols.

Fraunhofer a mis au point une technique et déposé une demande de brevet allemand (référence : 10 2020 122 843.0) pour un dispositif et une méthode permettant les activités agricole et l'utilisation énergétique de la lumière solaire de manière simultanée. Le système agrivoltaïque intègre la collecte des eaux pluviales et utilise une sous-structure en forme de V, ajustable pour répondre aux besoins spécifiques et aux exigences des modules.

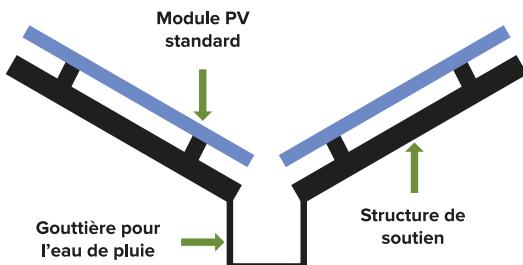


Schéma 6 : Systèmes PV de collecte des eaux pluviales en forme de V

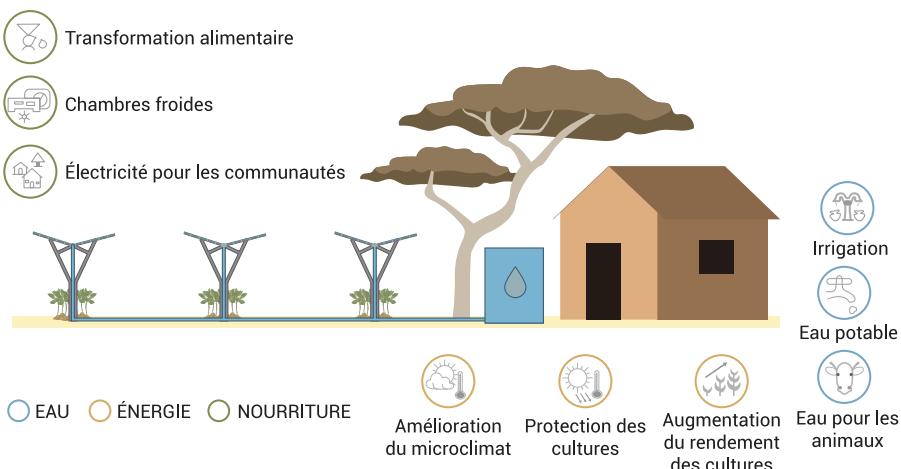


Schéma 7 : Illustration d'un système agrivoltaïque pour la collecte des eaux pluviales qui montre la triple utilisation de l'agrivoltaïque sur les terres.

## 6. Analyse agricole

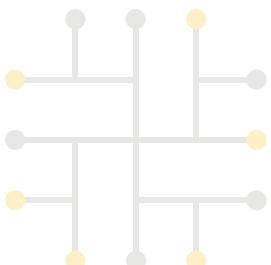
- **Cultures non vivrières** : Bien que la canne à sucre soit la principale culture de l'île Maurice, ses besoins en plein soleil, sa hauteur et ses exigences en matière de mécanisation peuvent faire obstacle à une mise en œuvre économiquement viable d'un système agrivoltaïque. Le potentiel du thé pour l'agrivoltaïque réside dans sa tolérance à l'ombre, sa culture nécessitant une main-d'œuvre importante, et ses succès internationaux, notamment au Japon. Cependant, en raison de sa culture dans la partie centrale, très humide de l'île Maurice, le rendement électrique peut être relativement plus faible.
- **Cultures vivrières** : Les principales cultures vivrières produites en quantité à l'île Maurice sont la pomme de terre, la banane, la citrouille, l'oignon, la tomate, le chou, la calebasse, l'ananas, le concombre et la carotte. Des études ont montré qu'un taux d'ombrage de 25 à 35 % pour les tomates semble être bénéfique pour le rendement, réduisant ainsi les brûlures dues au soleil et la fissuration des fruits. Pour les concombres, l'ombrage peut être avantageux, bien que l'on ait observé dans certains cas une augmentation proportionnelle de la biomasse des feuilles et des tiges par rapport aux fruits récoltés. Les autres cultures étudiées dans cette analyse comprennent la pomme de terre, l'oignon, la carotte, les légumes verts à feuilles, les herbes culinaires, le gingembre, la banane et l'ananas.
- **Groupes de cultures** : La conception des systèmes agrivoltaïques est complexe et influencée par les facteurs environnementaux locaux, les types de cultures, les pratiques agricoles et les contextes socio-économiques. Pour les systèmes agrivoltaïques au sol avec espacement inter-rangées, l'écart entre les rangées est crucial pour garantir un espace suffisant pour les activités agricoles et éviter l'ombrage des modules photovoltaïques. Les systèmes surélevés, quant à eux, doivent être soigneusement disposés pour optimiser l'ensoleillement des cultures sous-jacentes, en tenant compte du rayonnement solaire et de la tolérance à l'ombre des cultures. Selon les différents types de systèmes agrivoltaïques, les cultures peuvent être regroupées comme suit :
  - **Groupe I** : Ce groupe comprend les cultures horticoles tolérantes à l'ombre, telles que les légumes verts à feuilles, certaines cultures racines, les cultures à haute valeur ajoutée et les petits arbres fruitiers, qui bénéficient de la protection supplémentaire offerte par les modules photovoltaïques. Pour ce groupe, les systèmes agrivoltaïques surélevés sont considérés comme appropriés.
  - **Groupe II** : Ce groupe comprend les cultures moins tolérantes à l'ombre, notamment certaines cultures en C4 telles que le maïs, la canne à sucre et le sorgho. La double utilisation des terres engendrera une augmentation continue de la productivité globale du terrain. Ainsi, des systèmes photovoltaïques avec espacement inter-rangées et verticaux peuvent être envisagés, ce qui se traduira par un CAPEX (dépenses d'investissement) inférieur.

Les serres peuvent être modernisées en intégrant des modules photovoltaïques ou être directement intégrées dans le processus de planification. Le schéma 8 illustre l'exemple d'une serre qui a été réaménagée pour intégrer des modules PV à sa toiture. Par ailleurs, les points suivants doivent être pris en compte lors du réaménagement d'une serre :

- **Disponibilité de la lumière** : un taux de couverture du sol de 20 à 25 %.
- **Contrôle de la température et de l'humidité** : Une ventilation suffisante pour éviter la prolifération de nuisibles et de maladies dus à l'augmentation de la température et de l'humidité causée par une ventilation réduite.
- **Structure de la serre** : Il est recommandé d'opter pour une structure en forme de Venlo ou de chapelle.
- **Matériau utilisé** : Le matériau idéal pour une serre est le verre. Une alternative telle que le polycarbonate est également favorable, suivie du plastique polyéthylène, qui est le plus couramment utilisé. Dans ce cas, une attention particulière doit être accordée à l'emplacement des modules photovoltaïques, car le plastique doit être remplacé tous les 2 à 5 ans. De plus, pour supporter le poids supplémentaire des modules PV, il est recommandé que la structure de montage de la serre soit en acier galvanisé afin de maintenir l'intégrité structurelle.



Schéma 8 : Extérieur et intérieur de la serre rénovée.  
Des détails supplémentaires sont fournis en annexe, page 32.



## 7. Analyse Économique

Ce chapitre fournit les informations de base nécessaires à l'évaluation économique des systèmes photovoltaïques à l'île Maurice et présente l'outil Excel élaboré pour calculer les coûts actualisés de l'énergie (LCOE).

Cette analyse économique décrit la fonctionnalité, énumère les paramètres d'entrée pertinents et examine les facteurs influençant la rentabilité à travers une analyse de sensibilité. Un système agrivoltaïque n'est pas seulement optimisé pour maximiser la production d'énergie solaire photovoltaïque, il prend également en compte les rendements agricoles. Par exemple, l'augmentation de la hauteur des systèmes surélevés pour faciliter et optimiser l'activité agricole (c'est-à-dire pour permettre le passage aisément des machines sous les modules photovoltaïques) entraîne des coûts plus élevés pour la sous-structure. Un espacement plus large entre les rangées se traduit par un rendement énergétique/électrique plus faible par unité de surface, ce qui nécessite plus de terres pour produire la même quantité d'énergie qu'un système photovoltaïque standard au sol. De plus, les modules photovoltaïques semi-transparents sont plus coûteux que les modules opaques standard sans espacement entre les cellules solaires, car une plus grande surface de module est nécessaire pour obtenir la même production électrique.

À l'île Maurice, le développement du marché de l'agrivoltaïque nécessite des incitations plus importantes que pour les systèmes photovoltaïques classiques tel que les fermes solaires. Cette nécessité découle des exigences structurelles uniques des systèmes agrivoltaïques, où les modules photovoltaïques sont surélevés pour faciliter les activités agricoles sous-jacentes. La conception doit également tenir compte des vents cycloniques de la région, ce qui nécessite des structures de montage robustes capables de résister à ces forces et solidement ancrées pour éviter leur déplacement.

En outre, le transport du matériel contribue à l'augmentation des coûts. Par exemple, les dépenses d'investissement (CAPEX) pour l'unique système agrivoltaïque de grande envergure installé à l'île Maurice (200 kWc) s'élèvent à environ 1 600 euros par kWc, soit environ 60 % de plus que pour les systèmes photovoltaïques classiques à grande échelle ( $> 2$  MW). Cela s'explique non seulement par le renforcement de la sous-structure, mais aussi par la taille plus réduite du système agrivoltaïque par rapport aux installations photovoltaïques à grande échelle, dont la capacité dépasse souvent 1 MW. En raison des économies d'échelle, un système photovoltaïque de 1 MWc engendre des coûts d'investissement spécifiques nettement inférieurs à ceux d'un système de 200 kWc, car les systèmes à grande échelle ( $> 2$  MW) nécessitent moins de dépenses spécifiques en termes d'euros par kWc que les systèmes plus petits.

Pour éviter des hausses excessives du tarif de rachat, il est recommandé d'éviter de choisir des systèmes agrivoltaïques trop petits à l'île Maurice. Une puissance comprise entre 200 kWc et 1 MWc est considérée comme optimale pour ces systèmes, permettant de trouver un équilibre entre la rentabilité et les exigences structurelles spécifiques à la région.

## 7.1 Fondements du LCOE

Pour évaluer la nécessité de mettre en place des mesures d'incitation telles que des subventions et des tarifs de rachat (FIT), il est essentiel de connaître les coûts de production de l'électricité d'un système solaire PV.

Le LCOE est un calcul fondamental utilisé dans l'évaluation préliminaire d'un projet de production d'énergie.

### Pourquoi le coût actualisé de l'énergie est-il important ?

Le LCOE peut être utilisé pour déterminer s'il est judicieux de poursuivre un projet ou pour comparer différents projets de production d'énergie.

- Le LCOE est un facteur clé dans la décision de construire ou non un actif de production d'énergie. Les projets présentant un LCOE défavorable sont souvent abandonnés.
- Le LCOE est essentiel pour comparer diverses sources d'énergie telles que l'énergie éolienne, solaire et nucléaire.
- Il facilite la comparaison malgré les différences de durée de vie des projets, de coût d'investissement, de taille et des risques associés.
- Le taux d'actualisation spécifique utilisé pour chaque projet indique le niveau de risque qui lui est associé.

### Comment calculer le LCOE ?

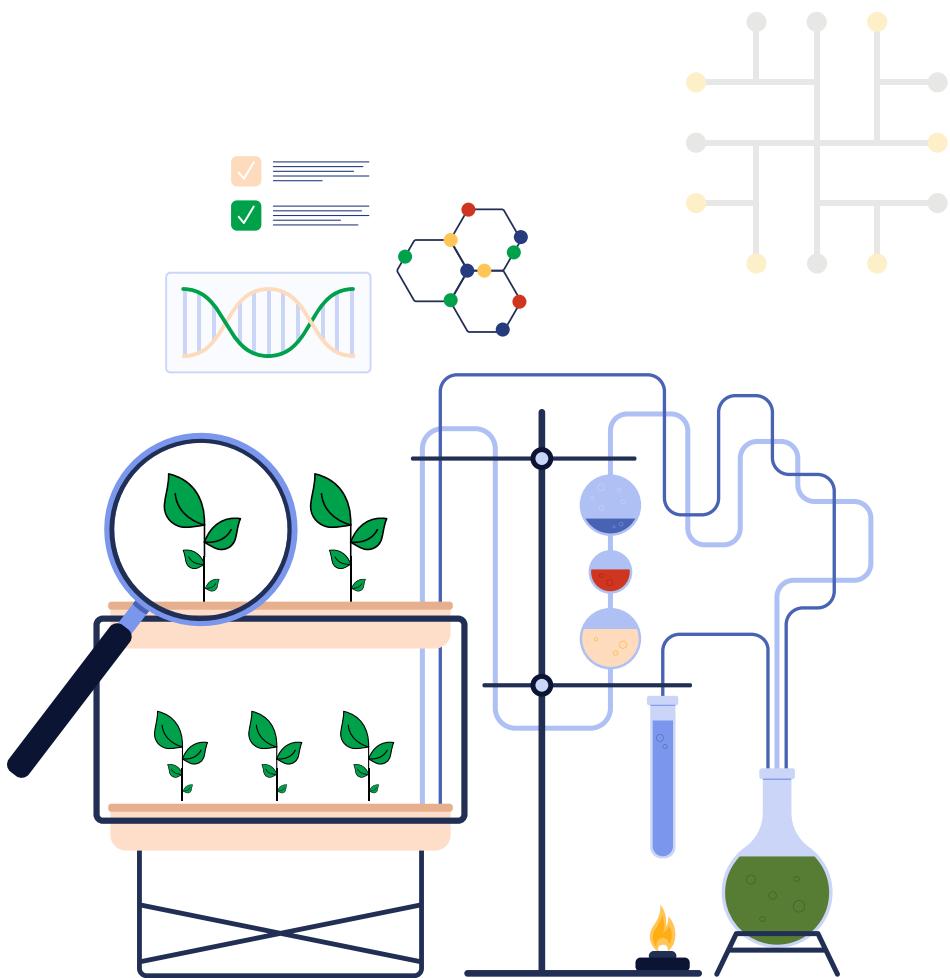
Le LCOE peut être calculé en prenant d'abord la Valeur Actuelle Nette (VAN) du coût total de construction et d'exploitation de l'actif de production d'énergie. Ce montant est ensuite divisé par la production totale d'électricité générée sur la durée de vie. Voir la formule (1) ci-dessous.

$$\text{LCOE} = \frac{\text{VAN du coût total sur la durée de vie}}{\text{VAN de la production totale d'électricité générée sur la durée de vie}}$$

## 7.2 Estimation du prix des systèmes agrivoltaïques à l'île Maurice

Les systèmes photovoltaïques à l'échelle commerciale coûtent environ 1 000 USD par kWc installé. En raison des structures surélevées et renforcées qui doivent être capables de résister à des vents cycloniques violents (jusqu'à 250 km/h), les coûts des systèmes agrivoltaïques à l'île Maurice seront nettement plus élevés. Le seul système agrivoltaïque existant sur l'île, installé par SUNfarming et mis en service en août 2023, est un système de formation agrivoltaïque de 200 kWc. Il en ressort qu'un coût spécifique d'environ 1 600 € par kWc à l'île Maurice est réaliste. Les dépenses d'investissement (CAPEX) sont valables pour un système à inclinaison fixe, mais dépendent également de la conception du système.

En raison des économies d'échelle, un système PV de 1 MWc entraîne des coûts d'investissement spécifiques nettement inférieurs à ceux d'un système de 200 kWc.



### 7.3 Analyse de sensibilité

Dans l'outil de calcul Excel-LCOE fourni, aucun coût de location de terrain n'est pris en compte. Il existe une option permettant d'ajouter le « bénéfice ou la perte annuelle de l'agriculture » dans la feuille « Paramètres d'entrée et Résultats » qui peut être utilisée pour inclure ces coûts, le cas échéant.

#### Analyse de sensibilité du LCOE

Le coût actualisé de l'électricité (LCOE) a été calculé en fonction des paramètres et des valeurs de référence suivants :

- [A] Prix du système : 1 200 €/kWc
- [B] Prix de vente de l'énergie : 0,10 €/kWh
- [C] Taux d'intérêt : 7 %
- [D] Rendement spécifique : 1 500 kWh/kWc
- [E] Durée de vie du système : 18 ans

Pour [A] *Prix du système* et [D] *Rendement spécifique*, ces valeurs de référence sont inférieures au niveau réel applicable à l'île Maurice, car le changement relatif des paramètres (écart de  $\pm 50\%$  par rapport à la référence) doit encore être effectué pour obtenir des chiffres raisonnables. [B] *Le prix de vente de l'énergie* est de 0,10 €/kWh, ce qui est légèrement supérieur au tarif de comptage net actuel de 0,084 9 EUR/kWh (= 4,2 MUR/kWh). Les autres paramètres [C] *Taux d'intérêt* et [E] *Durée de vie du système* sont basés sur les valeurs par défaut communiquées par Business Mauritius.

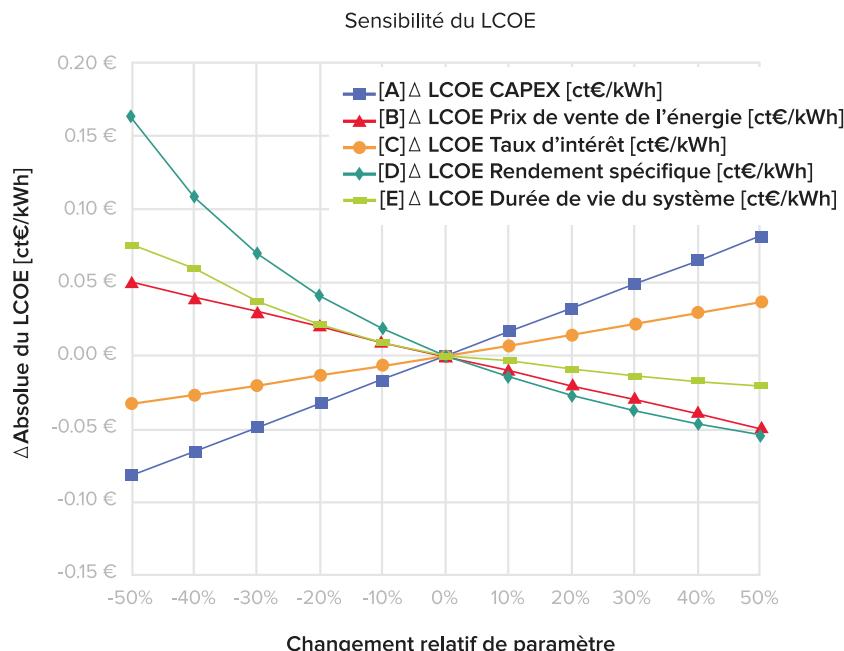


Schéma 9 : Sensibilité aux variations du LCOE en fonction des CAPEX, du prix de vente de l'énergie, du taux d'intérêt, du rendement spécifique et de la durée de vie du système.

Autres paramètres d'entrée (valeurs par défaut) : 18 ans de fonctionnement du système ; prix de vente de l'énergie 0,084 9 EUR/kWh (= 4,2 MUR/kWh) ; OPEX 2 % de l'investissement initial et 2 % d'augmentation annuelle ; performance PV annuelle dépréciée de 0,3 % ; 80 % de financement par emprunt et une période de remboursement de 7 ans.

Ces valeurs de référence définissent le point zéro des lignes de résultats du schéma ci-dessus. L'axe X indique le changement relatif des paramètres, tandis que l'axe Y affiche l'écart absolu du LCOE (également appelé delta) par rapport au LCOE calculé pour la valeur de référence.

#### **Éléments ayant le plus d'influence sur le coût de la production d'électricité solaire PV :**

- [D] Le rendement spécifique du système agrivoltaïque (un rendement spécifique plus élevé conduit à un LCOE plus bas, et il faut souligner qu'un rendement spécifique plus bas augmente considérablement le LCOE).
- [A] CAPEX du système photovoltaïque (un CAPEX plus élevé entraîne un LCOE plus élevé).
- [E] Durée de vie du système (une durée de vie plus longue réduit le LCOE, et il faut souligner qu'une durée de vie plus courte augmente considérablement le LCOE).

#### **Éléments ayant moins d'influence sur le coût de production de l'électricité solaire PV :**

- [B] Prix de vente de l'énergie (un prix de vente plus élevé réduit le LCOE).
- [C] Taux d'intérêt pour le financement de la dette (un taux d'intérêt plus élevé augmente le LCOE).
- OPEX (non indiqué dans le graphique ; des OPEX plus élevées augmentent le LCOE).

#### **Comme le montre le schéma ci-dessus :**

- [D] Le rendement spécifique a une forte influence sur le LCOE : avec 50 % du rendement spécifique (dans le modèle : 750 kWh/kWc au lieu de 1 500 kWh/kWc), le LCOE absolu augmenterait de 16 ct€/kWh. Cette augmentation n'est pas symétrique : un rendement spécifique 50 % plus élevé (ici 2250 kWh/kWc) réduira le LCOE de 5 ct€/kWh.
- [A] Le CAPEX a une forte influence sur le LCOE, et il est symétrique : avec 50 % du CAPEX (dans le modèle : 600 € au lieu de 1 200 € par kWc), le LCOE absolu diminuerait de 8 ct€/kWh.
- [E] La durée de vie du système n'est pas non plus symétrique : avec 50 % de la durée de vie du système (dans le modèle : 9 ans au lieu de 18), le LCOE absolu augmenterait de 8 ct€/kWh. Cependant, une durée de vie du système supérieure de 50 % (ici 27 ans) ne réduira le LCOE que de 2 ct€/kWh.
- [B] Un prix de vente de l'énergie plus élevé rend le projet plus rentable et une augmentation de 50 % entraîne une baisse du LCOE de 5 ct€/kWh. Ce paramètre est symétrique.
- Enfin, [C] le taux d'intérêt pour l'emprunt de 80 % de l'investissement financé par la dette a également une certaine influence : avec un taux d'intérêt de 3,5 % au lieu de 7 %, le LCOE absolu diminuerait de 3 ct€/kWh. Un taux d'intérêt 50 % plus élevé (10,5 % au lieu de 7 %) augmentera le LCOE de 4 ct€/kWh.

Le calcul du LCOE absolu en ct€ par kilowattheure d'énergie électrique PV générée est illustré dans le schéma 10 ci-dessous.

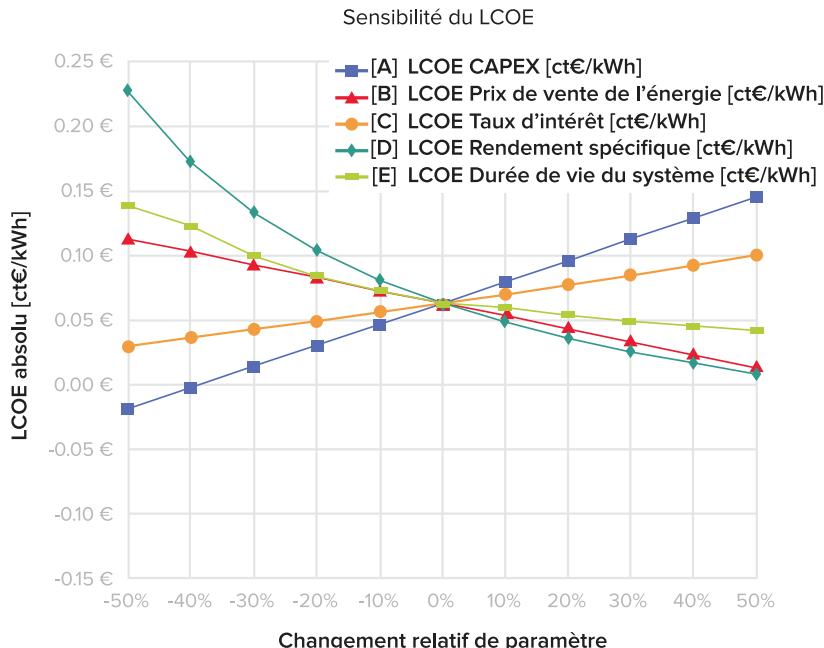


Schéma 10 : Sensibilité du LCOE absolu en fonction du CAPEX, du prix de vente de l'énergie, du taux d'intérêt, du rendement spécifique et de la durée de vie du système.

#### 7.4 Conclusion de l'analyse économique

Pour promouvoir le marché des systèmes agrivoltaïques à l'île Maurice, une incitation plus importante est nécessaire par rapport aux systèmes photovoltaïques standards à grande échelle. D'après les informations disponibles, les coûts spécifiques du seul grand système agrivoltaïque réalisé à ce jour (200 kWc) sont de l'ordre de 1 600 €/kWc. Ce CAPEX est environ 60 % plus élevé que celui des systèmes photovoltaïques classiques à grande échelle, dont les coûts spécifiques sont généralement inférieurs à 1 000 €/kWc.

La raison de ce CAPEX élevé est que les systèmes agrivoltaïques sont généralement surélevés pour permettre la production agricole sous les modules photovoltaïques. L'île Maurice est soumise à des vents cycloniques et la structure de montage doit être suffisamment solide pour résister à ces forces. La sous-structure doit être fermement ancrée au sol pour éviter que les vents violents ne l'arrachent, ce qui constitue un facteur de coût important.

Un autre facteur est le coût d'expédition du matériel à l'île Maurice, qui est plus élevé que dans les régions desservies par des navires-porte-conteneurs et où de très gros volumes sont traités.

En raison des économies d'échelle, un système PV de 1 MWc est nettement moins cher en termes de coûts d'investissement spécifiques (€/kWc) qu'un système de 200 kWc. Pour réduire ces coûts d'investissement spécifique, les projets ne doivent pas être trop petits. Par conséquent, une taille comprise entre 200 kWc et 1 MWc semble raisonnable pour les systèmes agrivoltaïques à l'île Maurice.

# 8. Définition et cadre juridique de l'agrivoltaïque

## Définition

La définition suivante de l'agrivoltaïque pourrait être insérée dans le cadre juridique mauricien : « *Installation solaire sur des terres agricoles utilisées principalement pour la production agricole et accessoirement pour la production d'électricité* ».

Cette définition pourrait être incluse dans la Sugar Industry Efficiency Act (loi sur l'efficacité de l'industrie sucrière). En effet, la question la plus importante dans le domaine de l'agrivoltaïque est liée à la réglementation sur les permis de conversion des terres contenue dans cette loi.

Les futurs programmes de la CEB consacrés au projet agrivoltaïque pourraient se référer à la définition qui figurera dans la Sugar Industry Efficiency Act.

## Critères applicables aux systèmes agrivoltaïques à l'île Maurice

Il est recommandé que la section 28 de la Sugar Industry Efficiency Act inclue les critères suivants à respecter par les développeurs de projets agrivoltaïques :

- L'installation agrivoltaïque doit garantir le maintien de la production agricole ;
- Le rendement de la parcelle ciblée ne doit pas descendre en dessous d'un seuil fixé (entre 10 % et 40 %) ;
- La surface maximale qui ne peut plus être utilisée à des fins agricoles en raison de la structure de l'installation PV ne doit pas dépasser un seuil fixé (par exemple 15 % pour les systèmes inter-rangées et 10 % pour les systèmes surélevés).
- Les résidus de construction doivent être évacués lors du démantèlement. Il est recommandé de mettre en place des garanties financières pour assurer ce démantèlement.
- L'installation peut être mise en place sur les sites suivants : terres arables, terres avec des cultures permanentes ou pérennes, prairies, sauf dans les zones protégées.
- L'installation agrivoltaïque doit offrir au minimum un service à la production agricole. Ces services peuvent comprendre l'amélioration ou le maintien des rendements ou de la qualité de la production, l'atténuation des effets du changement climatique sur les plantations, la protection des parcelles agricoles contre les aléas météorologiques, l'amélioration du bien-être des animaux (grâce à l'installation de dispositifs de protection thermique), l'optimisation de la gestion des eaux pluviales ou la réduction de l'évapotranspiration.
- L'installation ne doit pas nuire aux fonctions écologiques du sol.

Un système de contrôle et de surveillance doit être mis en place pour garantir le respect de ces critères. Une inspection doit être effectuée lors de la mise en service de l'installation, puis régulièrement pour vérifier le respect des critères (le calendrier des inspections dépend de la production de l'installation). L'exploitant doit fournir à l'autorité compétente les rapports de contrôle établis par un organisme ou un expert agricole indépendant, ainsi que les factures d'achat des semences.

Un rapport émanant d'un organisme/expert indépendant doit également être fourni au moment du démantèlement.

Une autorité de contrôle compétente devra être mise en place. Il pourrait s'agir d'un comité composé de représentants des entités concernées (par exemple, le ministère des Finances, FAREI, la Chambre d'agriculture, l'association des petits planteurs). Le non-respect des règles doit être sanctionné par des pénalités financières, le retrait ou la suspension de l'autorisation d'exploitation de l'installation.

### Permis et licences

**Permis de conversion des terres :** La section 28 du Sugar Industry Efficiency Act devrait expressément stipuler qu'un permis de conversion des terres n'est pas nécessaire pour les projets photovoltaïques qualifiés.

### Contrats de bail

Le modèle actuel de bail pour les terres agricoles doit être adapté aux projets agrivoltaïques. Les dispositions doivent préciser l'utilisation des terres, l'accès à l'installation, les pratiques d'entretien, la description de l'activité agricole et son évolution, les travaux de construction ou d'entretien justifiant la suspension temporaire de l'activité agricole et l'indemnisation en cas de suspension de l'activité agricole due à des travaux d'intervention importants.



## Annexes

### Composants du système de collecte des eaux pluviales

Tableau 1 : Composants nécessaires à la mise en oeuvre d'un système de collecte des eaux pluviales dans le cadre d'un système agrivoltaïque.

1 Récupération de l'eau de pluie		
1.1 Système de gouttières		
1.1.1	Gouttières (y compris les angles et les sorties)	Vinyle, aluminium ou acier, largeur minimale de 117 mm
1.1.2	Suspensions et supports	Vinyle, aluminium ou acier
1.1.3	Tuyau de descente	Vinyle, aluminium ou acier
1.1.4	Embouts	Vinyle, aluminium ou acier
1.1.5	Douilles et coude	Vinyle, aluminium ou acier
1.1.6	Solin	Si nécessaire, à préciser par l'entrepreneur
1.1.7	Fixations (vis, écrous et boulons)	Galvanisé
2 Système de pompage et de stockage de l'eau		
2.1 Unité de pompage		
2.1.1	Fabricant	À préciser par l'entrepreneur
2.1.2	Série	À préciser par l'entrepreneur
2.1.3	Type de moteur	Moteur CA ou CC sans balais
2.1.4	Matériau de l'équipement de pompage	Acier inoxydable résistant à la corrosion AISI 304 ou supérieur
2.1.5	Débit journalier	En fonction des besoins et de la disponibilité en eau
2.1.6	Hauteur manométrique totale	Garanti au point de fonctionnement
2.2 Contrôleur		
2.2.1	Fabricant	À préciser par l'entrepreneur
2.2.2	Série	À préciser par l'entrepreneur
2.2.3	Protection contre l'eau et la poussière	Minimum IP65
2.2.4	Protection du moteur	Fonctionnement à sec, surtension et soustension, protection contre les surcharges, protection contre la température
2.2.5	Câble	Résistance aux UV
2.2.6	Efficacité	95% Minimum
2.3 Dépôt et tuyauterie		
2.3.1	Capacité en eau du dépôt	50,000L au minimum
2.3.2	Hauteur de l'installation du dépôt	Selon le système d'irrigation
2.3.3	Matériau de la tuyauterie d'eau	PVC (y compris les vannes manuelles)
2.3.4	Tuyaux d'eau DIN	Dimensionné en fonction du débit d'eau souhaité

Capacité des cultures à être cultivées dans le cadre de l'agrivoltaïsme

Tableau 2 : Exemples de cultures en plein champ appropriées et leur réponse à l'ombrage.

Cultures en plein champ	Ratio d'ombrage	Réponse au rendement	Lieu d'implantation	Climat	IGH [kwh/m <sup>2</sup> ]
<b>Légumes</b>					
Pommes de terre	35 %	-20 % à 11 %	Allemagne	Cfb – Tempéré chaud entièrement humide avec été chaud	1211
Chou-fleur	25 %	31 %	Sri Lanka	As – Savane équatoriale avec été sec	1982
Carotte	–	-11 % à -25 %	Bangladesh	Am – Climat tropical de mousson	1622
Aubergine	30 %	-47 % à -55 %	Hawaï, États-Unis	As – Savane équatoriale à été sec	1757
Patate douce	30 %	-15 % à 3 %	Hawaï, États-Unis	As – Savane équatoriale à été sec	1757
<b>Fruits</b>					
Raisin	50 %	2 % à 13 %	Israël	Csa – Climat tempéré chaud avec été sec et chaud	2030
Citron	50 %	-35 % à 15 %	Espagne	BSh – Steppe aride chaude	1787
Orange	25 %	15 % – 64 %	Égypte	BWh – Désert aride chaud	2049
Ananas	45 %	7 %	Brésil	Aw – Savane équatoriale à hiver sec	1843
<b>Légumes secs</b>					
Arachide	30 %	1 %	Hawaï, États-Unis	As – Savane équatoriale à été sec	1757
Haricot rouge	32 %	-37 %	Corée du Sud	Cfa – Tempéré chaud entièrement humide avec été chaud	1455
Soja	32 %	-30 %	Corée du Sud	Cfa – Tempéré chaud entièrement humide avec été chaud	1455
<b>Autres</b>					
Thé	75 %	5 %	Japon	Dfa – Neige avec été chaud humide et chaud	1422
Basilic	50 %	0 %	Brésil	Aw – Savane équatoriale avec hiver sec	2016
Thym	73 %	17 %	États-Unis	Cfa – Tempéré chaud entièrement humide avec été chaud	1445

*Les légumes à feuilles tels que les épinards, la laitue, le chou et le chou frisé sont également d'excellentes cultures pour les systèmes agrivoltaïques.*

#### **Groupe de cultures I**

Le groupe de cultures I comprend les cultures horticoles qui tolèrent l'ombre dans une certaine mesure et qui bénéficient d'une protection. Les cultures telles que les légumes verts à feuilles (laitue, choux et épinards), ainsi que les cultures racines telles que les pommes de terre, les radis, les betteraves et les carottes entrent dans cette catégorie. Ce groupe inclut également d'autres cultures à forte valeur ajoutée et de petits arbres fruitiers tels que le raisin, les prunes et les pommes, qui conviendraient à un système agrivoltaïque surélevé.

#### **Groupe de cultures II**

Le groupe de cultures II comprend les céréales telles que le riz, le maïs, le blé, l'orge, le sorgho et potentiellement la canne à sucre. Comme beaucoup de ces cultures sont soumises à l'importation et ne sont pas économiquement viables à l'île Maurice, elles ne sont peut-être pas cruciales pour cette étude de faisabilité, mais elles seront tout de même discutées prochainement. La plupart des cultures mentionnées, comme le maïs et la canne à sucre, sont des cultures C4. Elles utilisent le mécanisme de fixation du carbone en C4 pour augmenter leur efficacité photosynthétique en réduisant ou en supprimant la photorespiration, qui se produit principalement en cas de faible concentration de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère, de forte luminosité, de température élevée, de sécheresse et de salinité. Par conséquent, elles ne sont pas adaptées aux conditions d'ombre intense.

#### **Systèmes agrivoltaïques potentiels : Systèmes agrivoltaïques surélevés et destinés aux vergers**

La tolérance à l'ombre plus élevée des cultures horticoles du groupe de cultures I signifie que les systèmes agrivoltaïques surélevés sont généralement adaptés. L'agrivoltaïque destiné aux vergers est simplement une sous-catégorie de l'agrivoltaïque surélevée, étant essentiellement des systèmes surélevés modifiés pour être utilisés au-dessus d'arbres fruitiers et de vignes, tels que le raisin.

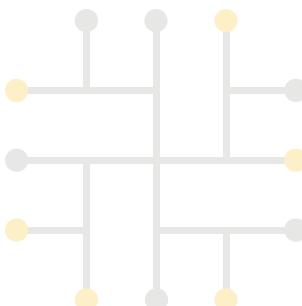


Tableau 3 : Exemples de cultures adaptées aux serres et leur réponse à l'ombrage.

Cultures sous serre	Ratio d'ombrage	Réponse au rendement	Emplacement	Climat	GHI [kwh/m <sup>2</sup> ]
<b>Légumes</b>					
Poivron	50 %	14 %	Égypte	BWh – Désert aride chaud	2108
Chou-fleur	50 %	80 %	Sri Lanka	As – Savane équatoriale à été sec	1982
Laitue	40 %	1 %	Égypte	BWh – Désert aride chaud	2108
Tomate	20 %	-6 % – 6 %	Espagne	BSh – Steppe aride chaude	1878
<b>Fruits</b>					
Fraise	73 %	-3 % – 48 %	Égypte	BWh – Désert aride chaud	2031
<b>Autres</b>					
Basilic	50 %	28 % – 169 %	États-Unis	BSh – Steppe aride chaude	2150
Gingembre	50 %	2 % – 60 %	Inde	Aw – Savane équatoriale à hiver sec	1860

#### Potentiel de la canne à sucre pour l'agrivoltaïque :

**Physiologie et tolérance à l'ombre :** La canne à sucre, comme les céréales telles que le maïs, le sorgho et le millet, appartient aux plantes C4, qui peuvent utiliser efficacement la lumière disponible par rapport aux plantes C3. Par conséquent, elles prospèrent souvent en plein soleil, ce qui les rend plus adaptées aux systèmes avec espacement inter-rangées qu'aux systèmes surélevés. Cependant, en raison de la hauteur de la canne à sucre, il est nécessaire de prendre en compte les effets d'ombrage sur les modules PV dans un système avec espacement inter-rangées. De manière générale, peu de recherches ont été menées sur l'impact de l'ombrage sur la canne à sucre.

**Mécanisation :** Contrairement aux décennies précédentes, le secteur de la canne à sucre est passé d'une culture manuelle à une culture plus mécanisée, avec l'utilisation de machines agricoles telles que des récolteuses de canne et des tracteurs pour l'application de fongicides et d'herbicides. Cet aspect doit être pris en compte lors de la conception de systèmes agrivoltaïques avec espacement inter-rangées. Bien que la récolte manuelle soit encore pratiquée dans les petits champs isolés et les zones à forte pente, les zones plus humides avec plus de 2 500 mm de précipitations posent des défis aux machines lourdes telles que les moissonneuses, elles entraînent une érosion importante des sols en conditions humides.

**Risques environnementaux** : L'île Maurice est fréquemment touchée par des cyclones, la saison cyclonique s'étendant officiellement de novembre à mars. Les cyclones, caractérisés par de hautes vagues, des vents violents et de fortes précipitations, peuvent avoir des effets dramatiques sur la production de canne à sucre. On estime que la production annuelle moyenne est réduite de 5,6 % à cause des cyclones, tandis que pour les cyclones particulièrement intenses, le rendement des cultures peut être réduit jusqu'à 60 %. Les modules PV et leur sous-structure peuvent fournir une forme de protection contre le vent, prévenant ainsi l'érosion éolienne et la dessiccation, tout en protégeant physiquement les cultures. Cependant, les cyclones doivent être pris en compte dans la conception des structures, notamment du point de vue de leur résistance. De plus, elle est sensible à la sécheresse, étant une plante qui aime l'eau, et elle réagit par une baisse du rendement, surtout en cas de déficit hydrique au début de son développement. Les modules PV dans un système surélevé pourraient ainsi réduire la consommation d'eau des cultures et limiter l'évaporation du sol.

**Expérience internationale** : Une étude de faisabilité pour un système agrivoltaïque hypothétique destiné à la culture de la canne à sucre a été réalisée par Stefani et Felema (2021) dans une région centrale de l'État de São Paulo, bien qu'à notre connaissance, aucune mise en œuvre n'ait encore eu lieu.

**Conclusion** : La canne à sucre est la culture la plus produite à l'île Maurice, avec une chaîne de valeur bien développée, permettant également la production de bioéthanol et de biogaz, contribuant ainsi aux objectifs d'énergie renouvelable du pays. En raison de sa faible tolérance à l'ombre en tant que culture C4, de sa grande taille et de l'utilisation de machines lourdes, les systèmes agrivoltaïques surélevés ne seront probablement pas économiquement viables. En ce qui concerne les systèmes agrivoltaïques avec espacement inter-rangées, une perte significative de surface cultivable est attendue, car les modules PV, étant placés bas par rapport au sol, ne permettent pas la culture en dessous. Lorsqu'elles sont cultivées entre les rangées de modules, il est nécessaire de laisser un espace suffisant entre les cultures et les modules PV, car l'ombrage des plantes peut affecter le rendement des panneaux solaires.

#### Potentiel du thé pour l'agrivoltaïque :

**Machinerie** : En ce qui concerne la culture du thé, une grande partie du travail est encore réalisée manuellement ou avec l'utilisation de petites machines, telles que des mini-récolteuses, ce qui fait du thé une culture potentiellement adaptée aux systèmes agrivoltaïques surélevés.

**Tolérance à l'ombre** : Le thé est originaire de milieux naturels situés à l'ombre des arbres forestiers. Les plants de thé apprécient la protection contre le soleil du matin et la chaleur directe du soleil de l'après-midi. Plusieurs études ont été menées sur l'effet de l'ombrage sur le thé, en appliquant différents niveaux d'ombrage, comme celles de Mohotti (2004) et Wijeratne et al. (2008) au Sri Lanka. Il a été démontré qu'un niveau d'ombrage moyen (réduction de 35 % du rayonnement photosynthétiquement actif) est bénéfique pour le taux de photosynthèse des feuilles, augmentant ainsi la photosynthèse par rapport à une exposition en plein soleil ou à un ombrage élevé de 65 %. Une étude réalisée par Philip Owuor (1988) au Kenya a montré que le thé cultivé sous ombrage artificiel produisait un thé noir de meilleure qualité que dans des conditions non ombragées. Les résultats ont révélé un thé avec des concentrations plus élevées en théaflavines, des concentrations réduites en

théarubigines, un meilleur indice de saveur, ainsi qu'une évaluation des dégustateurs plus favorable pour les conditions ombragées, tandis que la teneur en caféine est restée identique pour les conditions ombragées et non ombragées. En ce qui concerne l'impact de l'ombrage sur la quantité de rendement, les résultats sont peu nombreux. Une étude menée par Fang (2022), dans laquelle des filets d'ombrage de différentes couleurs ont été utilisés pour couvrir le *Camellia sinensis* avec 95 % d'ombre pendant 2 semaines en juin 2021, a révélé que ce niveau élevé d'ombre réduisait considérablement la densité des bourgeons (-54,8 %), le poids frais des bourgeons (-23,9 %) et le rendement (-65,8 %) pour le filet d'ombrage noir, tandis que les résultats pour les filets d'ombrage bleu et rouge ne montraient qu'une légère réduction par rapport aux conditions non ombragées.

**Climat** : Le thé est principalement cultivé dans les zones fertiles de haute altitude du plateau central à l'île Maurice. Les précipitations y sont plus élevées que dans les régions côtières, et l'irradiation horizontale est plus faible, surtout par rapport à la région côtière nord, ce qui rend cette région moins favorable à la production d'énergie photovoltaïque par rapport à d'autres parties du pays. En revanche, les températures moyennes plus basses sur le plateau central pourraient avoir un impact positif sur l'efficacité des modules photovoltaïques.

**Expérience internationale** : En ce qui concerne les exemples internationaux de culture du thé dans le cadre de systèmes agrivoltaïques, le thé est l'une des cultures les plus populaires au Japon. En 2021, 15 systèmes ont été installés dans des fermes japonaises. Il a été constaté que les modules photovoltaïques ont permis de créer des conditions de croissance plus douces, d'atténuer l'exposition directe au soleil pendant les saisons chaudes et de prévenir la formation de gel pendant les saisons froides. De manière générale, l'agrivoltaïque a le potentiel de revitaliser la culture du thé dans certaines régions, comme la préfecture de Shizuoka. Exemple de système agrivoltaïque pour la culture du thé au Japon : <https://www.businessinsider.com/agrivoltaic-farming-solar-sharing-growing-more-popular-in-japan-2022-12>

**Synergies supplémentaires** : Il a été rapporté que les conditions de travail en plein champ sont difficiles en raison des températures élevées et de l'irradiation solaire, particulièrement à partir de midi. L'ombrage fourni par les modules photovoltaïques pourrait donc améliorer les conditions de travail.

**Conclusion** : De manière générale, le thé semble être une culture bien adaptée au système agrivoltaïque, car il semble tolérer l'ombre produite et pourrait même en bénéficier en termes de qualité du rendement. De plus, en raison de la forte proportion de travail manuel, les machines ne devraient pas être un critère d'exclusion, et l'ombrage pourrait même améliorer les conditions de travail. Il existe déjà des systèmes agrivoltaïques dans d'autres pays, comme au Japon, ce qui en fait un système populaire. Cependant, en termes de production d'énergie photovoltaïque, le thé est cultivé dans une région où les précipitations sont supérieures à la moyenne et où le terrain est montagneux, ce qui signifie que la couverture nuageuse réduit les rendements solaires.

