

Faisabilité d'un projet pilote agrivoltaïque en  
Afrique Occidentale et Centrale

## **Livrable 2.3 : Exigences architecturales**

Spécifications de conception pour les installations  
photovoltaïques en contexte agricole

4 Décembre 2025



Funded by  
the European Union



# Rapport

Titre	Exigences architecturales Spécifications de conception pour les installations photovoltaïques en contexte agricole
Version	4
Date	04/12/2025
Auteurs	Anna Bargues (Institut Becquerel)- expert ENR Caroline PLAZA (Institut Becquerel) – expert agriPV
Relecture et validation	Caroline PLAZA (Institut Becquerel) – technical lead Laurent De Block (Planair) – économiste Emel MRAD (IdeaConsult) – agroéconomiste

# SOMMAIRE

1. Introduction et concepts clés
2. Architectures PV
3. Production électrique
4. Premiers projets pilotes en Afrique





# **1. Introduction et concepts clés**

Ce travail s'inscrit dans le cadre du **projet agrivoltaïque multi-pays** porté par le PNUE, le CTCN et l'Union européenne, dont l'objectif global est de réaliser une **étude de pré faisabilité de l'Agrivoltaïsme** dans les pays demandeurs (le Sénégal, la Guinée, le Togo et la RDC). Il constitue une étape clé vers l'élaboration d'une **feuille de route** qui sera présentée lors d'un atelier multi-pays et qui formulera des **recommandations opérationnelles** pour le développement de l'Agrivoltaïsme dans ces pays.

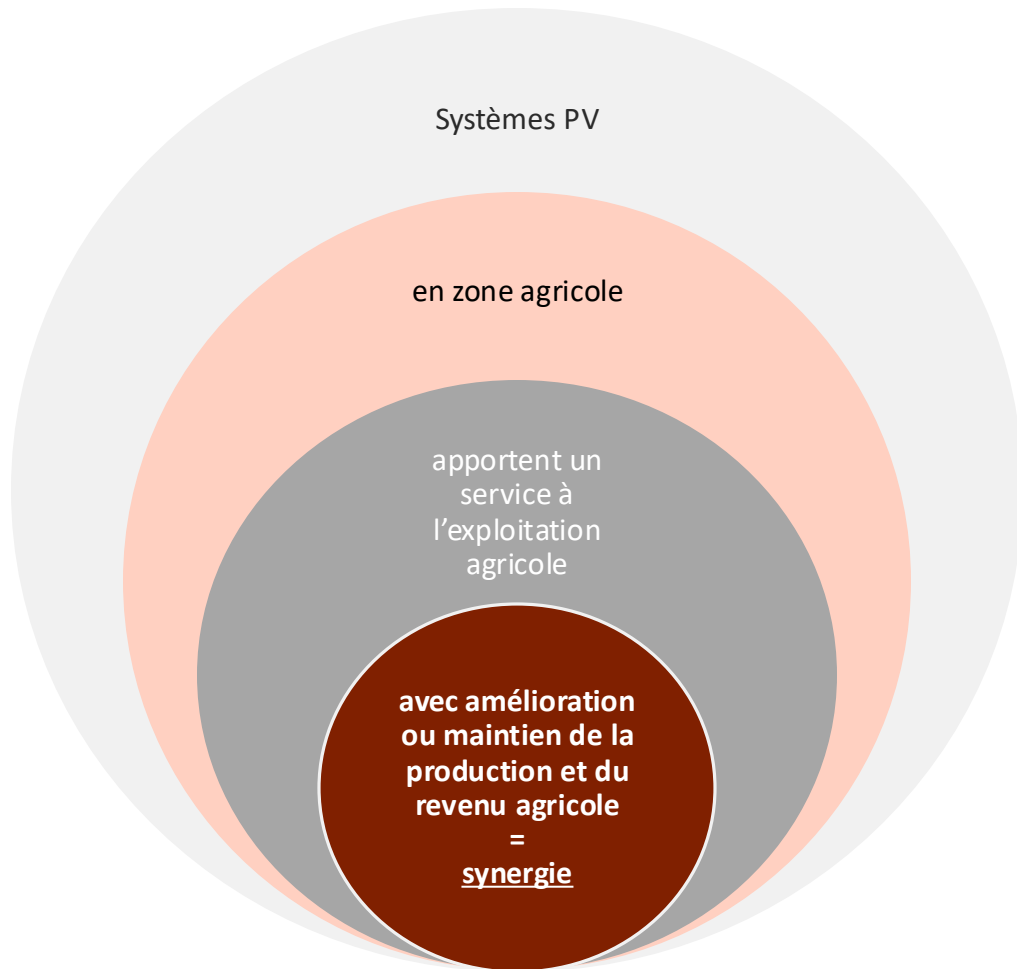
L'agrivoltaïsme représente une approche innovante d'**usage combiné des terres**, conciliant les besoins alimentaires et énergétiques dans un contexte de transition écologique et de pression foncière croissante. En associant infrastructures photovoltaïques et activités agricoles, ces systèmes offrent une **opportunité d'optimiser l'utilisation du sol**, d'améliorer la **résilience des exploitations face au changement climatique** et de **diversifier les revenus agricoles** tout en produisant une énergie renouvelable locale.

Pour chaque typologie de système agrivoltaïque, sont présentés les spécificités **architecturales**, les **contraintes techniques**, les **impacts possibles sur les activités agricoles et énergétiques**, ainsi que des **recommandations de conception**.

L'objectif est de détailler les **conceptions et design de projets** selon différents types de systèmes PV (fixe, à suivi, vertical, ombrière, récupération d'eau etc.). Des **cas d'étude préliminaires** illustrent ces configurations. Sont également définis les indicateurs comme le **taux d'occupation du sol (GCR)** ou le **Land Equivalent Ratio (LER)**, permettant une première approche de l'équilibre entre les activités. Enfin, la **production électrique annuelle théorique** a été calculée selon plusieurs hypothèses de densité d'installation, ainsi que la **surface nécessaire pour couvrir la consommation d'un village type** au Sénégal et en RDC. Les plages de valeurs reflètent les variations selon l'architecture et les conditions énergétiques propres à chaque pays.

# L'agrivoltaïsme, lorsqu'il est défini, a une définition plus restrictive au sein des installations PV en milieu agricole

Des installations agrivoltaïques sont aujourd'hui déployées dans plusieurs pays, dans certains à l'échelle de plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de MWc. La Chine, le Japon, la Corée du Sud, les Etats-Unis, la France, l'Italie, l'Allemagne et les Pays-Bas comptent tous un certain nombre d'exemples existants depuis plusieurs années. Il n'existe cependant pas de définition universelle de l'agrivoltaïsme. Les pays ou les régions définissent à leur échelle les critères techniques de l'agrivoltaïsme.



Le Japon est un pionnier de l'agrivoltaïsme, définissant en 2003 le partage des terres pour la production d'énergie en plus de la production agricole. Des critères sont établis pour que celle-ci soit maintenue.



En France, les synergies entre les productions agricoles et énergétiques, et en particulier le service rendu à l'agriculture conditionne l'obtention de permis pour une installation en zone agricole.



L'Allemagne a publié une norme nationale (DIN SPEC 91434) caractérisant l'agrivoltaïsme. Le maintien de l'activité agricole se fait par des critères liés au rendement agricole.



L'Italie distingue les systèmes agrivoltaïques simples et avancés, ces derniers étant les seuls éligibles aux mécanismes de soutien. Ils sont sujets à de plus nombreux critères pour assurer la continuité de l'activité agricole.



Aux Etats-Unis, le laboratoire national des énergies renouvelables (NREL) définit l'agrivoltaïsme mais il n'existe pas encore de cadre national ou de mécanisme de soutien.

# ***Selon la configuration des systèmes PV, le niveau de synergie avec l'activité agricole varie, de même que les coûts et les rendements de production agricole et énergétique***

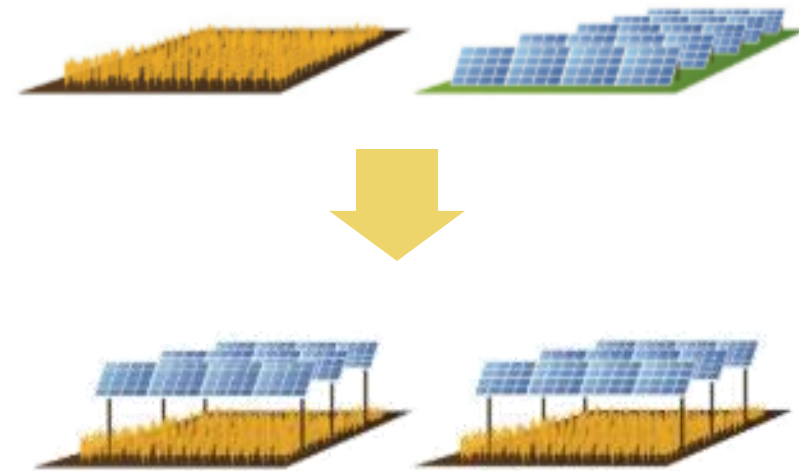
## **DEFINITION**

La densité du système photovoltaïque, son productible, son coût par rapport à une installation conventionnelle **varient entre les configurations**.

L'impact de l'activité de production d'énergie sur l'activité agricole **varie également**. La surface laissée à l'activité agricole, et l'impact sur le rendement agricole dépendent de la configuration et des adaptations réalisées.

Les technologies PV utilisées sont, pour la plupart, matures (structures, modules PV, trackers, équipements électriques et connexions).

Les **configurations « système PV / culture / conditions climatiques »** sont très vastes et la maturité de déploiement est hétérogène entre les systèmes agrivoltaïques. Il n'existe pas encore beaucoup de retours d'expérience en Afrique Centrale et de l'Ouest sur ces différentes configurations.



**Le principe fondateur de l'agrivoltaïsme est l'utilisation combinée des terres pour la production d'énergie et la production agricole. L'agrivoltaïsme a une définition plus restrictive que le photovoltaïque sur les terres agricoles.**



## *Plusieurs indicateurs sont utilisés pour mesurer des installations agrivoltaïques: la performance énergétique, agricole et la performance combinée*

# INDICATEURS

- ✓ Le **LER (Land Equivalent Ratio)**, qui compare la superficie utilisée pour une production combinée par rapport à celle que l'on obtiendrait avec des cultures séparées. Un LER supérieur à 1 indique un gain global. Les systèmes à la conception optimisées dépassent 1 (>1), indiquant une synergie entre les activités
- ✓ Le **GCR (Ground Coverage Ratio)**, ou taux de couverture au sol, correspond au rapport entre la surface PV et la surface totale du terrain occupée par le système. Il dépend directement de la densité du système PV et de son design de l'installation (espacement entre rangées, nombre de modules ou densité de cellules PV dans un modules).
- ✓ L'efficacité d'usage de l'eau (**WUE : Water Use Efficiency**) qui est le ratio entre la quantité de biomasse produite et le volume d'eau consommé.
- ✓ Une des indicateurs pour évaluer la performance économique de l'installation PV est le **LCOE (Levelized Cost of Electricity)**, qui est la somme des coûts actualisés de production d'énergie divisée par la quantité d'énergie produite, elle aussi actualisée (typiquement sur environ 30 ans pour du solaire PV), il représente le coût de production d'un kWh sur toute la durée de vie du système (n'inclut pas la production agricole).
- ✓ **La NPV (Net Present Value)** est la différence entre les revenus actualisés et les dépenses actualisées du projet peut être calculé pour la partie PV, la partie agricole, mais également de manière combinée

# Définition détaillée du LER – Land Equivalent Ratio



Le **LER** est un **indicateur de synergie** entre production agricole et production photovoltaïque.

Il permet de comparer la productivité totale d'un système agrivoltaïque à celle d'usages séparés de la terre pour un projet spécifique.

**Formule générale :**

$$LER = \frac{Y_{agrivoltaic,agri}}{Y_{reference,agri}} + \frac{Y_{agrivoltaic,PV}}{Y_{reference,PV}}$$

Où :

- $Y_{agrivoltaic,agri}$  = rendement agricole sous panneaux (kg/ha ou €/ha)
- $Y_{reference,agri}$  = rendement agricole de référence (par exemple sur une parcelle de référence sans panneaux)
- $Y_{agrivoltaic,PV}$  = production électrique (kWh/ha) du système agrivoltaïque
- $Y_{reference,PV}$  = production électrique d'un système PV de référence (centrale au sol optimisée pour la production d'énergie)

**Interprétation :**

- **LER = 1** → le système produit autant que la somme de deux usages séparés (terre 100 % agricole + terre 100 % PV).
- **LER > 1** → synergie positive : la même surface produit plus qu'en séparant les usages.
- **LER < 1** → concurrence d'usage : perte de productivité globale.

**Valeurs typiques :**

- Agrivoltaïsme bien conçu : **LER entre 1,2 et 1,6**.
- Mauvais couplage (ombrage excessif ou cultures inadaptées) : **LER < 1**.

# Définition détaillée du GCR – Ground Coverage Ratio



Le **GCR (Ground Coverage Ratio)**, ou **taux de couverture au sol**, est défini comme le rapport entre la surface totale des panneaux photovoltaïques et la surface totale du terrain occupée par le système agrivoltaïque.

$$\text{GCR} = \frac{\text{Surface des panneaux photovoltaïques}}{\text{Surface totale du terrain utilisée par le système AV}}$$

Pour les panneaux semi-transparentes, le GCR est ajusté en fonction de la transmission lumineuse réelle. Ainsi, un panneau qui laisse passer 20 % de la lumière (transmittance = 0,2) aura un GCR effectif réduit de 20 % par rapport à un panneau opaque.

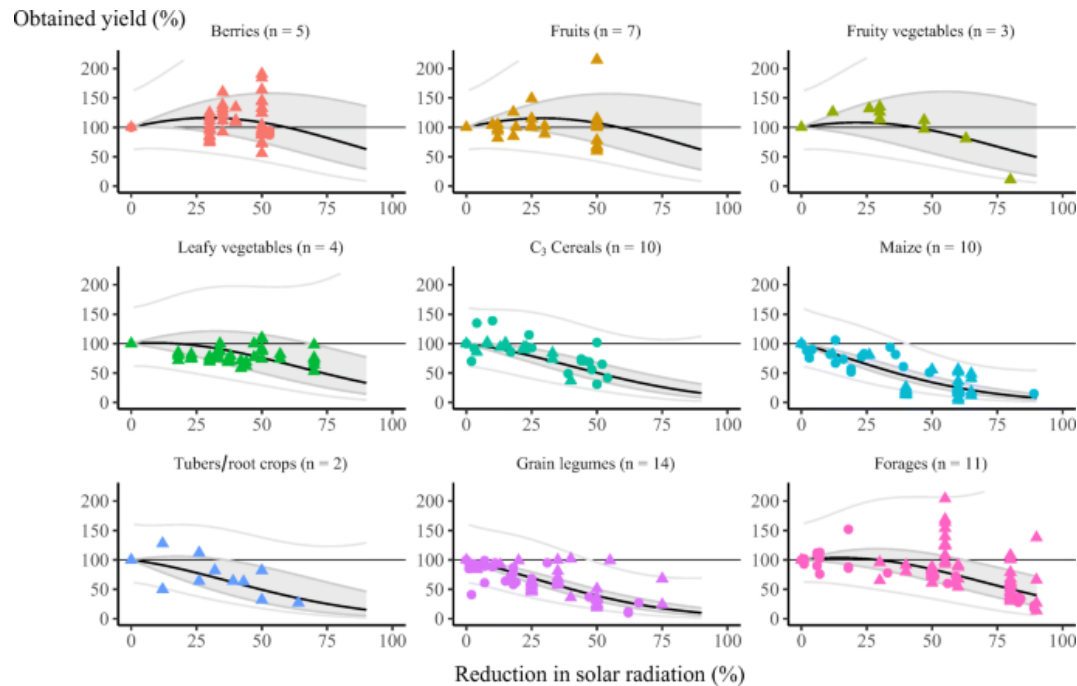
Selon Dupraz (2024), il constitue un indicateur simple permettant d'évaluer la **densité de couverture solaire** d'un système agrivoltaïque, d'estimer indirectement la **part de lumière disponible pour les cultures**, et de **l'impact possible sur la productivité agricole potentielle**.

Ainsi, il recommande de limiter le CGR (les données sont calculées pour les climats tempérés) pour préserver la productivité agricole tout en produisant de l'électricité.

## Les systèmes agrivoltaiques doivent s'adapter aux cultures et aux conditions climatiques, des résultats scientifiques sont publiés mais encore peu en zone Sub-Saharienne

- ❑ Les configurations et l'intégration à la production agricole, sont spécifiques aux secteurs agricoles et aux conditions climatiques. Les **configurations « systèmes PV/cultures/conditions climatiques »** sont très vastes.
- ❑ Les modules PV créent une alternance d'ombre et de lumière qui influence la croissance des plantes. Certaines cultures, comme les plantes de mi-ombre (petits fruits, légumes feuilles), s'adaptent mieux aux variations d'ensoleillement. Les plantes peuvent aussi réagir physiologiquement : élargissement des feuilles, étioilage, changement de concentration en pigments. La disposition et l'architecture des systèmes influencent la répartition de la lumière et de l'eau. Des publications scientifiques existent mais elles ont encore récentes et ne couvrent pas l'ensemble des cultures et des climats.
- ❑ « De nombreuses cultures tropicales tolérantes à l'ombre sont souvent cultivées dans des systèmes agroforestiers, comme le café, le cacao, le thé et la vanille. Celles-ci n'ont jusqu'à présent été incluses dans **aucune expérience agrivoltaïque**. Elles offriraient pourtant un intérêt, étant donné qu'elles pourraient **mieux supporter l'ombre** que les cultures annuelles tempérées. Davantage de résultats issus de pays tropicaux sont nécessaires afin d'évaluer si les **cultures tropicales peuvent être plus performantes que les cultures tempérées** dans les systèmes agrivoltaiques. » *Assessment of the Ground Coverage Ratio of Agrivoltaic Systems as a Proxy for Potential Crop Productivity – Christian Dupraz, Agroforestry Systems (2024)*

Dans les climats tempérés des tendances générales peuvent être observées, les cultures réagissent différemment à l'ombrage et le taux de couverture solaire a un impact fort



- Tolérant / Bénéficiaire de l'ombrage : Baies, fruits, légumes-fruits → peuvent bénéficier d'un ombrage modéré
- Neutre sous ombrage modéré : Les légumes-feuilles et les cultures fourragères
- Sensible à l'ombrage : les céréales, le maïs, les tubercules, les plantes-racines et les légumineuses

**Mais d'importantes incertitudes subsistent:**

- les résultats dépendent du type de culture et du type de conditions climatiques à laquelle elles sont exposées
- Forte variation d'une année sur l'autre, mais données à long terme limitées
- Différences entre les variétés au sein d'un même type de culture (p. ex. pomme)
- Biais/décalage par rapport aux conditions d'événements climatiques extrêmes
- La valeur agronomique dépend également de la qualité
- Influence de la rotation des cultures

**Deux stratégies**

- Faible couverture solaire, large gamme de cultures
- Une couverture solaire plus élevée, des cultures ciblées : produisant moins de biomasse, menacées par le changement climatique (par exemple, fruits, vignes).

Sources: Laub, M., Pataczek, L., Feuerbacher, A. et al. Contrasting yield responses at varying levels of shade suggest different suitability of crops for dual land-use systems: a meta-analysis. *Agron. Sustain. Dev.* **42**, 51 (2022) // Stephan Schindele, Maximilian Trommsdorff, Albert Schlaak, Tabea Obergfell, Georg Bopp, Christian Reise, Christian Braun, Axel Weselek, Andrea Bauerle, Petra Högy, Adolf Goetzberger, Eicke Weber, Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications.

# *Les recherches agronomiques mettent en évidence plusieurs impacts positifs possibles sur les cultures selon les configurations et des premiers retours positifs au Kenya et en Tanzanie*

## RETOUR D'EXPERIENCE

- ✓ D'ombrage et de réduction de l'évapotranspiration des plantes - jusqu'à 30% sous les panneaux, selon leur densité, leur orientation, leur pilotage, et le climat
- ✓ De baisse de la température sous les panneaux et de diminution de la pénibilité du travail au champ
- ✓ De protection contre les aléas climatiques: le gel (en milieu tempéré), la grêle, l'exposition excessive à la lumière responsable de la photo-inhibition et de risques de brûlures sur les fruits,
- ✓ De collecte des eaux de pluie et d'économie d'eau en général. Lors des pluies intenses, les panneaux et infrastructures peuvent limiter le ruissellement et être utilisés pour la récupération d'eau.
- ✓ De limitation de développement de maladies en protégeant les plantes de l'excès de pluie.
- ✓ En élevage, l'ombre fournie par les panneaux réduit la température de l'air et de l'eau, aidant les animaux à réguler leur température corporelle. Pour que les installations soient adaptées, il faut rehausser les structures pour permettre la libre circulation des animaux, protéger les câbles et éliminer les bords dangereux.

L'expérience tanzanienne menée par Randle-Boggis et al. (2023) a montré des rendements relatifs très élevés pour les haricots, les bettes et les épinards, mais des rendements modérés pour l'oignon et le poivron doux. Il s'agit de la seule étude disponible à la date de la revue de C. Dupraz (2024) menée dans un pays tropical. La largeur du système était faible, ce qui a pu induire des effets de bord.

Les premiers résultats publiés et présentés par le projet lui-même au Kenya sont également très positifs.

Résultats Kenya - Latia Agribusiness Solutions:

Rendements agri augmentés ( +123 % haricots, +91 % blette, +12 % maïs); -13,8 % irrigation, -16,7 % consommation réseau.

Résultats Kenya - Kibwezi Living Lab (peu de recul) :

Rendements fortement augmentés (Épinards +3 113 %, Niébé +233 %, Courgettes +287 %)



## **2. Architectures PV**

# ***Selon la configuration des systèmes PV, le niveau de synergie avec l'activité agricole varie, de même que les coûts et les rendements de production agricole et énergétique***

Parmi ces systèmes plusieurs configurations sont rencontrées:

- Les **systèmes surélevés**, également appelés ombrières, peuvent offrir une protection aux aléas et une adaptation au changement climatique, notamment via l'ombrage. L'implémentation de **systèmes mobiles** permet d'ajuster la position des modules selon les besoins de la culture et en fonction des conditions climatiques locales. Pour **les systèmes fixes** la quantité de lumière atteignant les cultures est déterminée au moment de la conception de l'installation PV. L'espacement des modules, voire des cellules PV, permet d'ajuster ce paramètre selon les besoins de la culture.
- Les cultures, notamment fourragères, ainsi que les activités de pâturage peuvent également prendre place entre les rangées d'installations photovoltaïques. Dans ce cas, les technologies PV employées sont celles des **centrales au sol** classiques, dont les paramètres tels que l'espacement des rangées peuvent être adaptés aux besoins de la culture ou de l'élevage.
- Les installations **verticales** sont un cas particulier de centrales avec cultures inter-rang, qui laisse davantage d'espace à l'activité agricole, avec une densité PV plus faible.

**La densité du système photovoltaïque, son productible, son coût par rapport à une installation conventionnelle varient entre les configurations.**

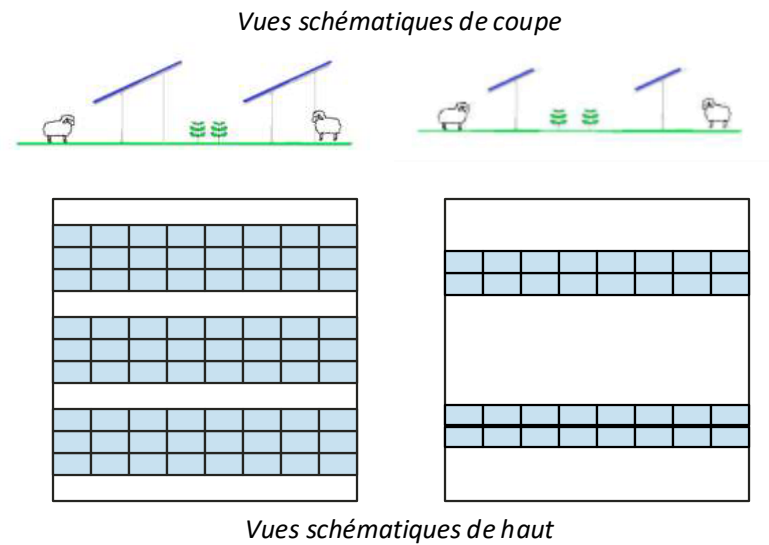
**L'impact de l'activité de production d'énergie sur l'activité agricole varie également** en lien avec la surface laissée à l'activité agricole. L'impact sur le rendement agricole dépend de la configuration et des adaptations réalisées pour l'activité agricole.

Les technologies PV utilisées sont, pour la plupart, matures : structures, modules PV, trackers, équipements électriques et connexions sont mis en œuvre dans d'autres segments avec des volumes importants.

**Les configurations et l'intégration à la production agricole, sont par contre spécifiques aux secteurs agricoles et aux conditions climatiques.** Les configurations « **systèmes PV/cultures/conditions climatiques** » sont très vastes et la maturité de déploiement est hétérogène entre les systèmes agrivoltaïques. C'est un segment innovant.

## Les centrales au sol en zone agricole s'appuient sur des technologies solaires classiques avec des adaptations légères, l'activité principale reste la production d'énergie

Les **centrales au sol** sur terres agricoles peuvent être assez similaires à des centrales solaires photovoltaïques classiques : modules PV standards, structures PV de 1 à 3 m orientées et inclinées de manière optimale (Sud et 10 à 25°). Les fondations, câblages et structures peuvent être adaptés pour limiter l'impact sur le sol et protéger les animaux en cas de co-activité avec de l'élevage. La technologie, mature et optimisée en coût, offre un productible et une densité élevée (~1 MWh/ha). L'espacement des rangées peut être ajusté pour l'usage agricole, ce qui entraîne une densité plus faible. Les centrales au sol fixes nécessitent une maintenance standard du PV, mais leur exploitation est contrainte par l'accessibilité agricole réduite, la gestion de la végétation sous les modules et l'adaptation limitée des machines agricoles autour des structures.



### Filières agricoles avec retours d'expérience dans le monde

- Pâturage (retour d'expérience principal en ovin, sites avec bovins)
- Grande culture, céréales en inter-rang



### Services à l'activité agricole

- Protection, ombrage pour l'élevage -> impact plus important pour les régions avec de fortes chaleurs
- Récupération de l'eau de pluie possible



### Technologie solaire et design

- Technologie modules PV, structure, onduleurs de technologies classiques
- Adaptation de l'espace entre les rangées de modules à l'activité agricole
- Adaptation dans la mise en œuvre structure et câblage à l'activité agricole pour minimiser les risques de blessures

# De grandes centrales PV au sol s'accompagnent parfois de cultures ou de pâturages

ARCHITECTURE PV

### Centrales au sol avec pâturages



### Centrales au sol avec cultures entre les rangées de modules (inter-rang)



### Centrales avec trackers





# Exemple de centrales au sol en zone agricole

## Centrale agrivoltaïque “Cow-PV” - Bavière, Allemagne

### Contexte général

- Projet situé à Biessenhofen (Bavière, Allemagne).
- Surface : 4,74 ha.
- Développé par Nestlé et BayWa r.e., en partenariat avec un éleveur local.

### Système photovoltaïque

- Puissance installée : 4,5 MWc.
- Environ 7 800 modules.
- Hauteur : 2,00 m pour les vaches, 1,80 m pour les jeunes bovins.
- Espacement entre rangées : 3,30 m

### Usages agricoles

- Pâturage de 65 bovins sous les panneaux.
- Production de fourrage via la fauche de l’herbe sous l’installation.
- Maintien complet de l’activité agricole.

### Bénéfices agronomiques et micro-climat

- Ombre et réduction du stress thermique pour les animaux.
- Protection contre les pluies fortes.
- Croissance du couvert herbacé stabilisée.

### Production électrique

- Environ 25 % de la consommation électrique de l’usine Nestlé.
- Raccordement direct pour autoconsommation.

### Exploitation / maintenance

- Structure surélevée adaptée au passage des animaux et des machines.
- Maintenance standard des modules.
- Protection renforcée des câbles pour éviter les dégradations.

### Bénéfices agronomiques attendus

- Optimisation de l’utilisation des terres (élevage + production solaire).
- Amélioration du bien-être animal.
- Couvert végétal favorisant la biodiversité.

### Dates clés

- Travaux débutés en mars 2025.
- Mise en service prévue fin 2025.
- Investissement : environ 3 M€.



## Exemple de centrales au sol en zone agricole Centrale solaire photovoltaïque – Marignac-Laspeyres

### Configuration générale

- Ancienne carrière de calcaire (ex-Lafarge), exploitée jusqu'en 2002.
- Emprise totale clôturée : 19,5 ha ; surface effectivement aménagée en centrale : 8,5 ha, répartie en six unités.
- Puissance installée visée : 5 à 7 MWc.
- Production attendue : ~14 GWh/an.

### Structure & implantation

- Environ 24 000 modules cristallins (260–360 Wc).
- Tables fixes orientées plein sud, rangées est-ouest.
- Inclinaison des panneaux : ~25°.
- Hauteur maximale : 2 m (bas de module à ~0,5 m du sol).
- Espacement inter-rangées : ~3 m (adapté au relief).
- Support : structures acier galvanisé ; fondations pieux battus ou vis d'ancrage (pas de dalle béton).

### Équipements électriques

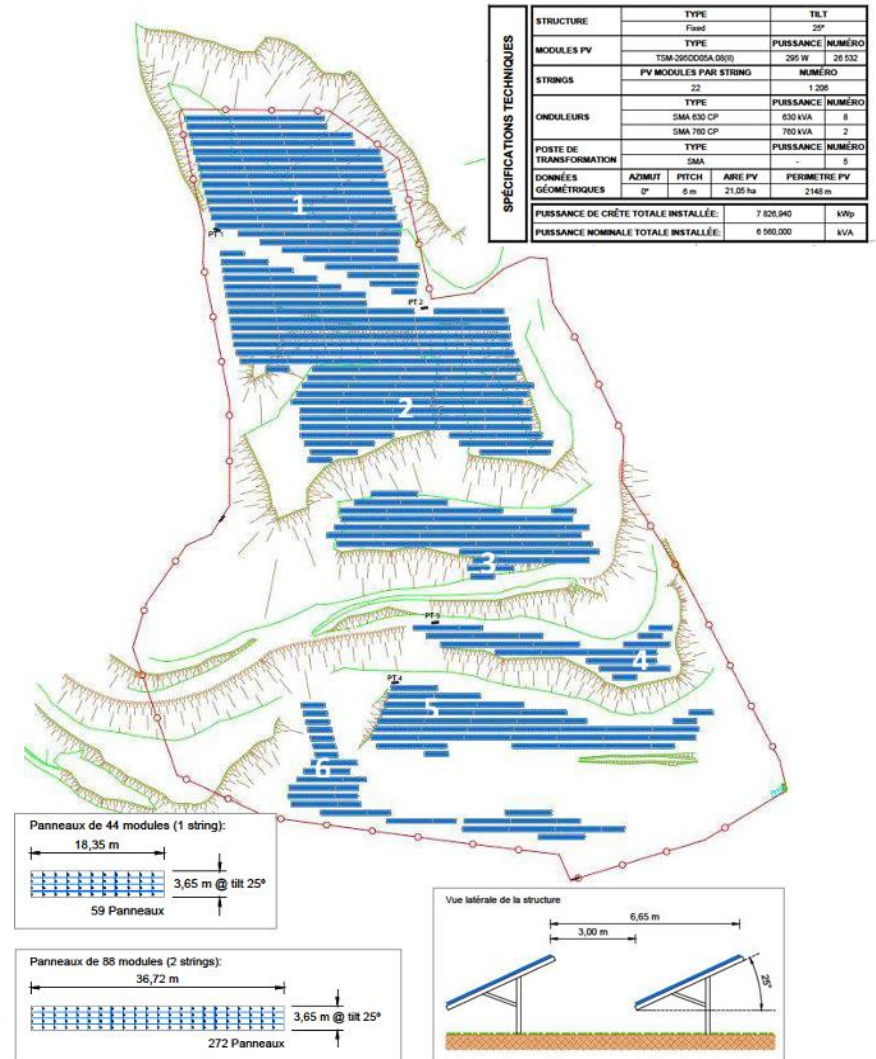
- Réseau BT (DC + AC amont transformateurs) puis HTA enterré jusqu'au poste de livraison.
- 4 postes de transformation (1,5–2 MW chacun) + 1 poste de livraison.

### Accès & exploitation

- Pistes internes de 2 à 4 m pour desserte des unités.
- Maintenance facilitée par conception simple (pas d'éléments mobiles), rangées accessibles.

### Autres caractéristiques pertinentes

- Choix technologique basé sur robustesse, rendement et filière de recyclage (PV Cycle).
- Implantation optimisée en concertation avec l'écologie (minimisation des impacts).
- Projet entièrement réversible (fondations non bétonnées, sols non artificialisés).



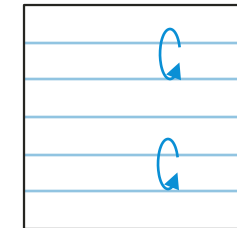
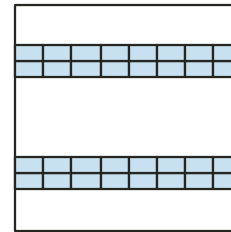
Plan d'implantation (d'après ENGINEERING, mars 2017)

## Ces centrales solaires type centrale au sol peuvent également mettre en œuvre des systèmes de suivi du soleil (trackeur)

Les centrales solaires peuvent également être mises en œuvre avec des **systèmes motorisés de suivi du soleil**. Les modules s'orientent automatiquement en fonction de la position du soleil. L'objectif est de maximiser la quantité d'énergie captée par les modules et la production d'énergie.

Les systèmes à suivi imposent une maintenance plus fréquente en raison des pièces mécaniques mobiles, avec des exigences accrues de fiabilité, de surveillance et d'accès pour prévenir les pannes affectant simultanément plusieurs rangées.

Vue schématique de coupe



Vue schématique de haut



© Akuo



© Baywa.re (ES)



Filières agricoles avec retours d'expérience dans le monde

- Pâturage (retour d'expérience principal en ovin, sites avec bovins) en inter-rang
- Grande culture, céréales en inter-rang



Services à l'activité agricole

- Récupération de l'eau de pluie difficile à mettre en place
- Ombrage



Technologie solaire et design

- Technologie modules et onduleurs de technologies classiques
- Tracking : technologie mature mais ajout de pièces et de moteurs
- Adaptation dans la mise en œuvre structure et câblage à l'activité agricole pour minimiser les risques de blessures



# Exemple de centrales au sol en zone agricole avec tracking

## Projet agrivoltaïque d'Allan (Drôme)

### Contexte général

- Site de 19,9 ha après optimisation.
- Objectif : intégration agrivoltaïque sur grandes cultures.

### Système photovoltaïque

- Puissance installée : 12,19 MWc.
- Technologie : trackers pour grandes cultures.
- Inclinaison jusqu'à 60° ; hauteur max 4,5 m.
- Espacement inter-rangées : 13,25 m.
- Surface de panneaux : 5,14 ha.
- GCR : 37 %.

### Usages agricoles

- Cultures : céréales à paille, lavandin, vigne, fraises, herbe.
- Plus de 90 % de SAU maintenue.
- Zone témoin de 1 ha pour suivi agronomique.

### Bénéfices agronomiques attendus

- Réduction de l'évapotranspiration : -50 %.
- Protection contre le stress hydrique.
- Amélioration de la réserve en eau des sols.

### Production & raccordement

- Poste source à 8 km ; capacité : 26,1 MW disponible.

### Exploitation / maintenance

- Suivi accru des mécanismes de tracking.
- Passage machines facilité par l'espacement.
- Coordination entre cycles agricoles et positions des trackers.

### Environnement

- Évitement des zones sensibles (zones humides, boisements).
- Clôtures adaptées à la faune ; haies paysagères.

### Planning

Permis : 2025–2026

Travaux : 2027

Mise en service : 2028



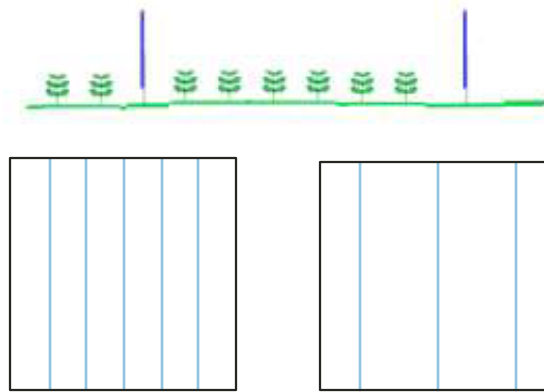
© Akuo

**Mécanisation**  
Marge de sécurité de 50cm entre les pieux et les cultures

## Ces centrales solaires type centrale au sol peuvent également mettre en œuvre des panneaux verticaux bi-faciaux

Les **modules PV verticaux, bifaciaux et autoportants**, sont espacés d'au moins 8 m pour permettre le passage des machines si l'activité est mécanisée et limiter l'ombrage. L'emprise au sol est faible mais la densité réduite ( $\sim 0,2$  MWc/ha). La hauteur des structures peut atteindre 3 m. En orientation Est-Ouest, la production décalée vers matin et soir peut avoir un profil intéressant selon le modèle économique. Il n'y a pas encore beaucoup de retour d'expérience de ce type d'implantation PV en région sub-saharienne. Les installations verticales bifaciales présentent des contraintes d'exploitation relativement faibles, mais nécessitent une attention particulière au maintien de la propreté des panneaux (salissures basses, projections) et à la gestion des passages agricoles perpendiculaires aux rangées.

Vue schématique de coupe



Vue schématique de haut



©Next2Sun (DE)



©Fraunhofer ISE



Filières agricoles avec retours d'expérience dans le monde

- Pâturage (retour d'expérience principal en ovin, sites avec bovins) en inter-rang
- Grande culture, céréales en inter-rang



Services à l'activité agricole

- Récupération de l'eau de pluie difficile à mettre en place
- Brise-vent
- Clôtures pour l'élevage



Technologie solaire et design

- Technologie: modules et onduleurs de technologies classiques
- Bifacial vertical: type de structure plus innovante
- Adaptation de l'espace entre les rangées de modules à l'activité agricole
- Adaptation dans la mise en œuvre structure et câblage à l'activité agricole pour minimiser les risques de blessures

*Les installations verticales bifaciales s'adaptent à l'espace nécessaire à l'agriculture*





# Exemple de centrales équipées de panneaux verticaux bi-faciaux

## TotalEnergies / Dijon Céréales – Channay

### Contexte général

- Projet pilote implanté à Channay (Côte-d'Or).
- Démonstrateur destiné à évaluer l'efficacité agronomique des systèmes verticaux bifaciaux sur grandes cultures.

### Système photovoltaïque

- Puissance installée : ~237 kWc.
- Technologie : panneaux verticaux bifaciaux, orientation est-ouest.
- 616 modules répartis en 14 rangées.
- Espacement inter-rangées : 12 m pour permettre la mécanisation.
- Très faible empreinte au sol (structure linéaire et verticale).

### Usages agricoles

- Cultures testées : blé, orge, lentilles, luzerne en agriculture biologique.
- Système compatible avec les grandes cultures grâce à l'orientation verticale.
- Maintien quasi intégral de la surface agricole disponible (faible occupation au sol).

### Production électrique

- Production linéaire optimisée grâce à la captation bifaciale est-ouest.
- Faibles pertes d'ombrage grâce à la verticalité.

### Exploitation / maintenance

- Maintenance simplifiée : aucune pièce mobile, structure verticale robuste.
- Enherbement géré entre rangées, favorable à la biodiversité.
- Large espacement facilitant le passage des machines agricoles sans restrictions.
- Nettoyage limité, principalement dû aux projections basses.

### Intégration environnementale

- Très faible artificialisation des sols.
- Conservation des continuités agricoles.
- Amélioration de la biodiversité via gestion herbacée.

### Dates clés

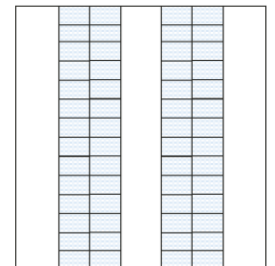
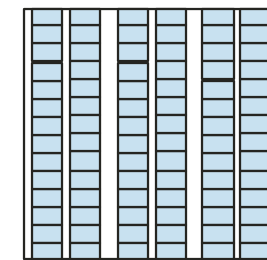
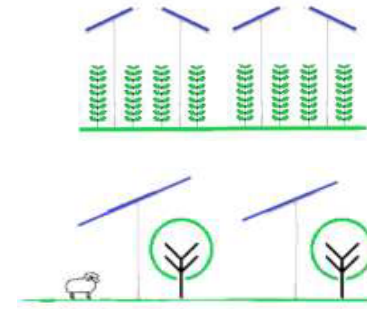
- Installation et mise en service : 2021–2022.
- Suivi agronomique continu depuis la mise en service.



## Les ombrières PV sont des systèmes assez classiques mais surélevés, dont la conception est adaptée en fonction des caractéristiques du projet agricole

Les **ombrières PV** sont des **structures surélevées** (4 à 5 m) permettant la circulation des engins agricoles ou la plantation d'arbustes. Leur conception varie (hauteur, espacement, type de modules) et peut être adaptée aux besoins de l'agriculteur. La densité PV va d'un niveau proche d'une centrale au sol à plus faible avec des modules semi-transparents ou selon l'espace entre les rangées de modules, ou entre les modules lui-même. Le design (espacement entre les rangées, hauteur et niveau d'ombrage) permet de s'adapter à l'activité agricole. La compréhension des variétés de cultures compatibles en divers lieux géographiques (territoire, variété, modes de culture, climat) n'est encore que partielle.

Les ombrières surélevées exigent une maintenance en hauteur plus complexe, nécessitant des équipements spécifiques, tout en assurant le maintien de la stabilité structurelle et l'absence d'interférences avec les opérations agricoles sous-jacentes.



Vues schématiques de coupe

Vues schématiques de haut

**Filières agricoles avec retours d'expérience dans le monde**

- Arboriculture, maraichage
- Pisciculture

**Services à l'activité agricole**

- Protection contre les aléas climatiques. Support pour filet contre la grêle ou les nuisibles
- Ombrage
- Diminution de l'évapotranspiration, réduction du besoin en eau
- Récupération de l'eau possible si structure en V mais à étudier

**Technologie solaire et design**

- Technologie modules PV, onduleurs de technologies classiques
- Structure surélevée (passage machine ou taille des arbres)
- Adaptation de l'espace entre les rangées de modules ou entre les modules eux-mêmes pour le besoin d'ombre
- Adaptation dans la mise en œuvre pour minimiser les risques de blessures

## *Ombrières fixes avec surélévation spécifique à l'activité agricole*





# Exemple de projet agrivoltaïque surélevé fixe BayWa r.e., Brabant-Septentrional – Pays-Bas

### Contexte général

- Projet situé aux Pays-Bas, dans le Brabant-Septentrional.
- Développé par BayWa r.e. pour la production fruitière locale.

### Système photovoltaïque

- Puissance installée : 8,7 MWc.
- Structure : ombrières fixes surélevées, sans tracking.
- Hauteur adaptée à la mécanisation ; couverture continue au-dessus des rangs.

### Usages agricoles

- Culture principale : framboisiers.
- Remplacement des tunnels plastiques par une couverture photovoltaïque.

### Bénéfices agronomiques

- Protection contre pluie, grêle et excès de chaleur.
- Réduction du stress hydrique ; meilleure homogénéité de production.

### Production électrique

- Production solaire de grande échelle injectée ou autoconsommée selon le site.

### Exploitation / maintenance

- Maintenance simple grâce à des structures fixes.
- Entretien habituel des cultures préservé ; accès machines garanti.

### Intégration environnementale

- Diminution de l'usage de plastiques agricoles.
- Meilleure résilience des cultures face au climat.

### Dates clés

- Mise en service au début des années 2020.



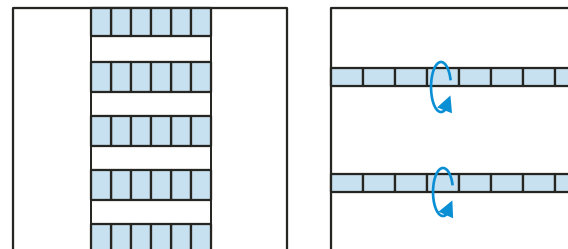
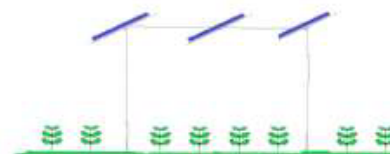
## Les ombrières mobiles, ou agrivoltaïsme dynamique, des systèmes innovants d'une plus grande technicité au service de la protection des cultures

Le système PV est **surélevé** par rapport à un système traditionnel de centrale au sol, **4 ou 5m au-dessus des cultures** pour permettre le passage d'engins et réduire l'impact de l'ombrage au sol. Il est équipé de motorisation sur 1 ou 2 axes, piloté par les besoins de l'activité agricole tout en optimisant la production électrique. Ce type d'installation est parfois qualifié d'agrivoltaïsme dynamique.

Le système doit être mis au point et l'impact sur l'activité agricole testé spécifiquement pour chaque filière et chaque client. La productivité agricole est améliorée ou faiblement impactée selon les premiers retours d'expérience.

Les ombrières avec suivi solaire combinent les contraintes de maintenance en hauteur et la complexité mécanique du tracking, nécessitant un accès sécurisé et une surveillance renforcée pour garantir la fiabilité du mouvement sans perturber les activités agricoles.

Vues schématiques de coupe



Vues schématiques de haut



©Fraunhofer (DE)



©Sun'Agri (FR)



Filières agricoles avec retours d'expérience dans le monde

- Viticulture, Horticulture, Arboriculture
- Grande culture
- Intérêt pour les productions à forte valeur économique à protéger des aléas



Services à l'activité agricole

- Protection contre les aléas climatiques. Support pour filet contre la grêle ou les nuisibles
- Ombrage dynamique en fonction des besoins de la plante
- Diminution de l'évapotranspiration, réduction du besoin en eau

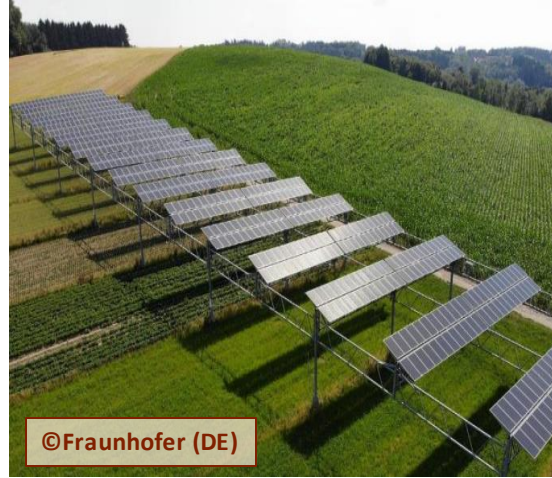


Technologie solaire et design

- Technologie modules PV, onduleurs de technologies classiques
- Structure surélevée (passage machine ou taille des arbres)
- Tracking: technologie mature mais ajout de pièces et de moteurs
- Algorithme spécifique à chaque culture: temps de développement très important

# *Ombrières mobiles, dont la position est adaptée selon le besoin des cultures*

# ARCHITECTURE PV



# Exemple de projet avec ombrières mobiles, ou agrivoltaïsme dynamique

## Domaine de Nidolères (Tresserre)



### Contexte général

- Localisation : Tresserre (66), Pyrénées-Orientales.
- Projet : agrivoltaïque dynamique sur vigne, démonstrateur pionnier.

### Système photovoltaïque

- Puissance : 2,1 MWc.
- Surface : 4,5 ha.
- Technologie : persiennes / panneaux mobiles pilotés automatiquement.
- Hauteur : 0,5 – 4,5 m ; passage des machines possible.
- Espacement inter-rang : 2,25 m.

### Usages agricoles

- Cultures : vigne (Grenache Blanc, Chardonnay, Marselan).
- Parcelle témoin : 3 ha sans ombrière.
- Densité : ~4 444 pieds/ha.

### Bénéfices agronomiques

- Réduction du stress thermique et hydrique.
- Optimisation de la qualité des raisins.
- Diminution de la consommation d'eau (~-20 %).

### Production & raccordement

- Énergie produite pour l'exploitation : ~642 foyers.
- Maintenance et pilotage pris en charge par le fournisseur.

### Exploitation / maintenance

- Ombrières automatisées selon météo et besoins des vignes.
- Passage des machines facilité par la hauteur des structures.

### Environnement

- Résilience climatique accrue (chaleur, sécheresse, gel).
- Double usage du foncier : énergie + viticulture durable.

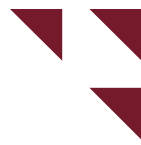
### Planning / résultats

- Mise en service : 2018 (démonstrateur initial).
- Deuxième installation : 2023, 3,8 ha supplémentaires.
- Rendement : +10–45 % selon cépage, consommation d'eau réduite de 20 %.



# Exemple de projet avec ombrières mobiles, ou agrivoltaïsme dynamique

## Champ agrivoltaïque du Cabanon – Saint-Etienne du Grès



### Configuration générale

- Environ 4,5 ha, dont 1,5 ha couverts.
- Trackers dynamiques permettant culture en plein champ (salades principalement).

### Structure

- Hauteur : 4,5 m sous structure.
- Travées  $\sim 8 \text{ m} \times 7,7 \text{ m}$  ; espacement de 4 m entre rangées.
- Fondations pieux battus (structure réversible).
- 6 888 modules installés.

### Technologie et pilotage

- Trackers avec deux modes : Tracking solaire ; Mode plante réduisant l'ombre lors des phases clés de croissance.
- Capteurs d'irradiance pour piloter l'inclinaison.

### Culture

- Culture de salades en rotation ; possibilité d'autres cultures (céréales, légumes).
- Irrigation permanente montée sur structure  $\rightarrow$  gain de temps et d'eau

### Bénéfices agricoles attendus

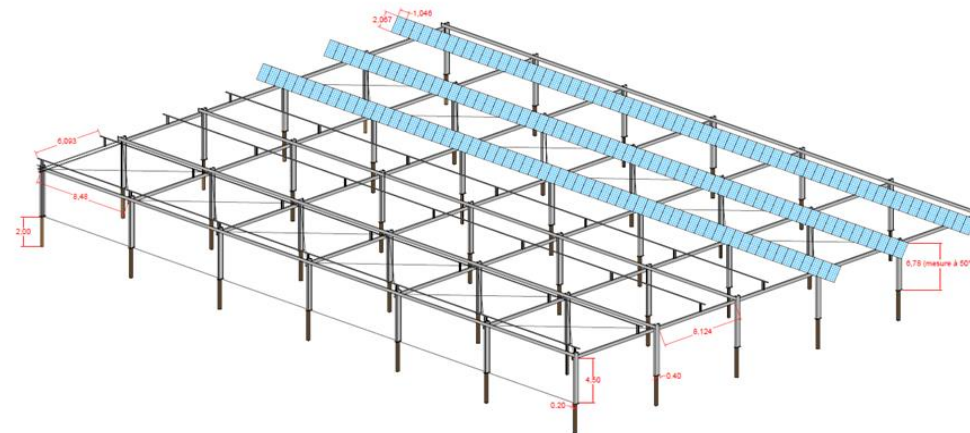
- Réduction du stress thermique et des brûlures.
- Diminution de l'évapotranspiration  $\rightarrow$  économies d'eau.
- Protection partielle contre grêle, pluies violentes, neige.
- Maintien ou amélioration des rendements.

### Suivi agronomique

- Réalisé par le CETA / APREL : maturité, qualité, économie d'eau, biodiversité, comparaison zone témoin.



Plan de masse (Voltalia)






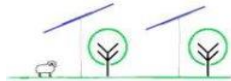
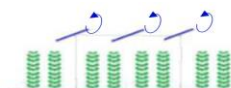
Coupe schématique de l'implantation des structures agrivoltaïques (Voltalia)



# **3. Production électrique**

## Production électrique selon le type d'architecture

Différents systèmes agrivoltaiques sont présentés et leur production électrique annuelle théorique a été calculée selon plusieurs hypothèses de densité d'installation. La surface nécessaire pour couvrir la consommation électrique annuelle d'un village type au Sénégal et en RDC a été obtenue. Les plages de valeurs reflètent les variations possibles selon l'architecture des systèmes et l'efficacité énergétique propre à chaque pays.

		Sénégal (Kaffrine)		RDC (Kindu)		
	Hypothèses de densité MWh/ha	Production annuelle GWh/ha*	Hectares nécessaires (pour 1 village) ha**	Production annuelle GWh/ha*	Hectares nécessaires (pour 1 village) ha**	
Centrales au sol avec culture en inter-rang,		0,2 – 1	0,35 – 1,74	0,3 – 1,4	0,13 – 0,66	0,25 – 1,2
Centrales au sol avec système de suivi		0,2 – 1	0,43 – 2,14	0,2 – 1,1	0,21 – 1,1	0,2 – 0,8
Systèmes verticaux bi-faciaux		0,2 – 0,3	0,35 – 0,52	0,9 – 1,4	0,13 – 0,2	0,8 – 1,2
Ombrière PV (avec culture sous l'installation)		0,2 - 0,5	0,35 – 0,87	0,5 – 1,4	0,13 – 0,33	0,5 – 1,2
Ombrière PV, tracking		0,4 - 0,7	0,86 – 1,5	0,3 – 0,5	0,42 – 0,74	0,2 – 0,4

\* Ces résultats proviennent des productibles calculés avec l'outil PVGIS (version 5.3), utilisant la base de données de rayonnement solaire PVGIS-ERA5 appliquée aux deux pays, angles et azimuts optimaux -> valeurs de productible retenues sont 1 740 kWh/kWc/an pour le Sénégal et 661 kWh/kWc/an pour la RDC. Les systèmes avec tracking bénéficient d'une majoration +400 kWh/kWc (appliquée ici)

\*\* Hypothèse : village de 1000 habitants avec, pour le Sénégal 472 kWh/personne/an → 472 MWh/an; et pour la RDC, 164 kWh/personne/an → 164 MWh/an (source lowcarbonpower.org)

Selon les configurations, la production annuelle d'un hectare peut couvrir les besoins électriques d'un village typique, mais certains systèmes nécessitent plus d'un hectare pour atteindre ce niveau. Les variations proviennent essentiellement de la densité d'installation et du niveau d'ensoleillement. Ces résultats montrent que, selon l'architecture retenue, une implantation agrivoltaïque peut contribuer de manière significative à l'alimentation énergétique locale au Sénégal comme en RDC.



## **4. Premiers projets pilotes en Afrique**

# Projets agrivoltaiques sur le continent africain

## Mali et Gambie – APV-MaGa



©Mbolo Association (GM)



©Mbolo Association (GM)

- Objectif : Viabilité techno-éco, modèle économique local, Nexus Eau-Énergie-Alimentation
- Installations : 5 démonstrateurs. 1 de 150 kWp au Mali (IPR/IFRA) et 4 en Gambie (~62.5 kWp chacun) dédiés à des usages variés (riziculture, chambre froide, plateforme de transformation, récupération d'eau de pluie).
- Acteurs : IPR/IFRA, Univ. Gambie, Fraunhofer ISE, PME locales
- Durée : 15/08/2020–31/07/2023



©Mbolo Association (GM)

## Projets agrivoltaiques sur le continent africain

### Kenya - Kibwezi Living Lab

©School of Geography, Development & Environment Arizona (US)



©MIT D-Lab (US)

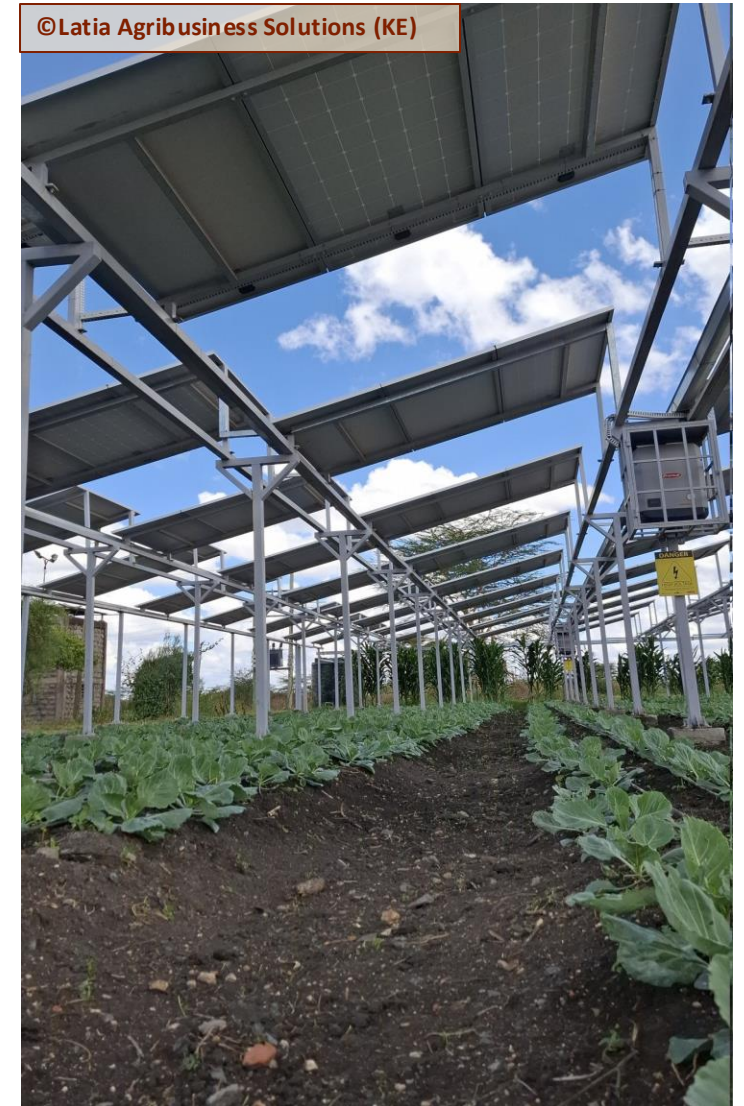


- Objectif : Sécurité alimentaire, irrigation solaire, autonomie économique, intégration jeunesse, formation agricole, recherche variétés locales
- Installations : 1 site pilote (à St. Patrick Ngomano), 252 ménages, 1 acre/ménage, panneaux solaires + pompes, cycle agricole de 3 ans
- Acteurs : Kasser Joint Institute, Jewish National Fund–USA, University of Arizona, Arava Valley (Israël), Gouvernement du comté de Makueni
- Cultures ciblées : Kale, épinards, amarante, butternut, pastèque, okra
- Date d'inauguration 20/06/2025
- Résultats : Rendements fortement augmentés (Épinards +3 113 %, Niébé +233 %, Courgettes +287 %)

## Projets agrivoltaïques sur le continent africain

### Kenya - Latia Agribusiness Solutions

- Objectif : Formation agricole & production commerciale
- Installations : 62 kWp / 40×20 m / 50 % densité  
Système grid-tie + récupération eau pluie (RWH) , Système fixe  
10 000 L de stockage
- Acteurs : Latia Farm (Kajiado County), Centre de formation & exploitation agricole
- Cultures ciblées : Haricots, blette, maïs
- Résultats : Rendements agri augmentés ( +123 % haricots, +91 % blette, +12 % maïs)  
-13,8 % irrigation, -16,7 % consommation réseau



# Projets agrivoltaïques sur le continent africain

## Tanzanie - Sustainable Agriculture Tanzania

- Objectif : Formation, agroécologie, autonomisation
- Installations : 36 kWp off-grid + batteries + RWH (eau de pluie), Dimensions 34×13×3 m, 50 % densité panneaux  
Système solaire avec batteries plomb-acide, Remplace générateurs diesel
- Acteurs : SAT, Union européenne (financement PrAECTiCe), 2 000 agriculteurs (depuis 2011), 72 groupes, 52 villages +50 000 agriculteurs communauté nationale
- Cultures & élevage ciblés : Légumes, volaille, poissons — système agricole intégré (engrais organique, boucle eau/nutriments)
- Date de lancement : 2011



## Projets agrivoltaïques sur le continent africain

### Togo - Kpessi

- Projet agrivoltaïque SUNTEC-Togo, capacité totale visée 10 MW.
- Phase 1 : 2 MW à Kpessi, sur terrain agricole.
- Panneaux installés à 3,5–4 m pour permettre les cultures en dessous.
- Intègre un système d'irrigation goutte-à-goutte alimenté par le solaire.
- Construction d'une ligne de raccordement



## Projets agrivoltaïques sur le continent africain

### Togo - Dalavé

- Projet Agrivoltaïque SUNTEC Togo SARL – Région Maritime, Dalavé
- Puissance installée : 2,04 MWc
- Production attendue : ~3,25 GWh/an
- Surface occupée : 9 373 m<sup>2</sup>
- Modules : 4 800 panneaux Solar Fabrik 425 W (mono), inclinés à 10°, orientations Est/Ouest
- Architecture : 4 zones (Q1–Q4) réparties en modules de 1 200 panneaux chacune
- Ombrière / structure : châssis acier galvanisé

