

Analyse de la concurrence entre les parcs photovoltaïques au sol et les autres usages des sols

Focus sur les solutions de l'agrivoltaïsme



Source : Imbert

Premier Rapport du programme RetD



Rédacteurs

Magali DAVID, Responsable d'études Environnement/ICPE – Environnementaliste
Et Sylvain LE ROUX, Directeur d'ENCIS Environnement - Docteur en Géographie

Assistés de :

Antoine MARTINEZ, Assistant de recherche et développement - Agronome

Éric BEUDIN, Responsable d'étude et développement – Ecologue spécialisé en phytosociologie

Raphael CANDEL-ESCOBAR, Responsable d'études Paysagiste

Comité de lecture

David GOUX, Chargé d'études – Environnementaliste spécialisé en géosciences

Romain GARCIA, Responsable d'études et Développement technique - Docteur en Géographie

Amaury CRUPELANDT, Responsable d'études - Agronome

Date : 24/10/2020



Sommaire

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| RÉSUMÉ..... | 4 |
| INTRODUCTION | 5 |
| 1.1. DEFINITION DE LA PROBLEMATIQUE ET DES HYPOTHESES | 5 |
| 1.1.1. <i>Sujet traité</i> | 5 |
| 1.1.2. <i>Postulats et questions de départ à vérifier</i> | 6 |
| 1.2. ÉTAT DE L'ART ET BIBLIOGRAPHIE | 7 |
| 2. CONCURRENCE DES PARCS PHOTOVOLTAÏQUES AVEC LES USAGES DES SOLS | 8 |
| 2.1. UN CONTEXTE NATIONAL DE DIMINUTION DES TERRES AGRICOLES | 8 |
| 2.2. LES PARCS PHOTOVOLTAÏQUES ET L'ARTIFICIALISATION DES SOLS | 10 |
| 2.2.1. <i>Une politique de préservation des terrains agricoles vis-à-vis des parcs solaires</i> | 10 |
| 2.2.2. <i>Superficies occupées par les parcs solaires et objectifs de développement</i> | 12 |
| 2.2.3. <i>Sols imperméabilisés ou non imperméabilisés ? telle est la question !</i> | 16 |
| 2.2.4. <i>Des zones délaissées aux zones agricoles</i> | 17 |
| 3. HISTORIQUE DE LA R&D EN AGRIVOLTAÏSME DANS LE MONDE | 19 |
| 4. SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES ADAPTEES A L'AGRIVOLTAÏSME..... | 23 |
| 4.1. CONCEPTION DES CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES LES PLUS COURANTES | 23 |
| 4.2. CENTRALES SOLAIRES FIXES CONVENTIONNELLES | 24 |
| 4.2.1. <i>Tables basses orientées vers le sud</i> | 24 |
| 4.2.2. <i>Tables fixes avec des panneaux orientés est et ouest</i> | 25 |
| 4.1. CENTRALES SOLAIRES EQUIPEES DE SUIVEURS | 26 |
| 4.1.1. <i>Tables solaires avec tracker à un axe</i> | 26 |
| 4.1.2. <i>Tables solaires avec un tracker à deux axes</i> | 27 |
| 4.2. CENTRALES SOLAIRES EXPERIMENTALES POUR L'AGRIVOLTAÏSME | 28 |
| 4.2.1. <i>Panneaux fixes en hauteur</i> | 28 |
| 4.2.2. <i>Panneaux mobiles en hauteur</i> | 29 |
| 4.3. PANNEAUX FIXES VERTICAUX ET BIFACIAUX | 31 |
| 4.4. SERRES PHOTOVOLTAÏQUES | 33 |
| 4.5. PANNEAUX SEMI-TRANSPARENTS..... | 34 |
| 5. EXEMPLES D'ORIENTATIONS AGRIVOLTAÏQUES ET RETOURS D'EXPERIENCE..... | 35 |
| 5.1. LES FERMES SOLAIRES ET L'ELEVAGE..... | 35 |
| 5.1.1. <i>Elevage ovin</i> | 36 |
| 5.1.2. <i>Elevage avicole</i> | 39 |
| 5.1.3. <i>Autres types d'élevage ?</i> | 40 |
| 5.2. PRODUCTION VEGETALE..... | 41 |
| 5.2.1. <i>Production de fourrages ou cultures</i> | 42 |
| 5.2.2. <i>Production maraichère : légumes et petits fruitiers</i> | 44 |
| 5.2.3. <i>Production viticole</i> | 51 |
| 5.2.4. <i>Arboriculture fruitière</i> | 53 |
| 5.3. APICULTURE | 56 |
| 5.4. AQUACULTURE | 59 |
| 5.4.1. <i>Pisciculture</i> | 59 |
| 5.4.2. <i>Production d'écrevisses</i> | 60 |
| 5.4.3. <i>Ostréiculture</i> | 61 |
| 6. QUELLES PERCEPTIONS SOCIALES POUR LES PROJETS AGRIVOLTAÏQUES ? | 61 |
| BIBLIOGRAPHIE | 63 |
| ANNEXE : RESUMES DE PRESENTATIONS DU COLLOQUE AGRIVOLTAÏCS 2020..... | 68 |



RÉSUMÉ

MOTS CLÉS :

De prime abord, les parcs photovoltaïques présentent le désavantage d'être consommateurs d'espace au sol. Pour une centrale au sol conventionnelle, l'occupation correspond à 1 à 1,5 ha pour un mégawatt crête installé. Fin juin 2019, la production du parc photovoltaïque français a permis d'alimenter 2,5 % de la consommation énergétique du pays. Cependant, le parc solaire français a vocation à se développer fortement, les objectifs nationaux de la Programmation Pluriannuelle de l'Energie, prévoient de passer de 9,9 gigawatts (GW) de solaire à fin 2019 à 35,1 à 44 GW en 2028 tous sites confondus (sols, toitures, ombrières...), dont 20,6 à 25 GW pour les parcs au sol. Cela pourrait représenter une surface totale d'approximativement 33 000 ha à 40 000 ha pour les parcs au sol, soit une moyenne de moins de 2 000 ha par an entre 2008 (date de la première centrale au sol) et 2028.

Les parcelles initialement seulement agricoles représenteraient de 10 à 14 % des parcs au sol en 2015. Un taux somme toute relativement faible pour l'instant à priori. En effet, la politique nationale privilégie actuellement les sites déjà artificialisés afin d'éviter la concurrence directe avec l'agriculture et la sylviculture, et d'offrir une seconde vie à ces sites (friches industrielles, zones d'activité désaffectées, anciennes installations de stockage de déchets et décharges, ...). Ces zones, bien que prometteuses en termes de potentialité théorique d'installation de parcs au sol ne sont cependant pas toutes exploitables (coûts de dépollution élevés, difficulté de raccordement électrique, ...). Le photovoltaïque sur terrains agricoles ne peut donc pas être exclu pour atteindre l'objectif de 25 GW de centrales au sol. On constate d'ailleurs depuis 2018, un fort intérêt de la filière des énergies renouvelables pour l'agrivoltaïsme. La SAU française représente 29 millions d'ha. Dans le cas théorique où les 40 000 ha de photovoltaïque au sol seraient réalisés sur des terres agricoles, cela représenterait l'équivalent de 0,14 % de la SAU.

En partant du postulat que les parcs photovoltaïques ne monopolisent pas la totalité des terrains qu'ils occupent (les surfaces au droit du sol représentent, selon les types de centrales de 10% à 70% de la superficie d'une parcelle), l'implantation de panneaux solaires au sol peut s'accompagner d'usages agricoles, soit sur les surfaces non couvertes par les panneaux, soit sous les panneaux eux-mêmes. Si les filières photovoltaïques et agricoles travaillent main dans la main, l'énergie photovoltaïque pourrait permettre d'offrir des opportunités de valorisation ou de relance agricole inattendues.

La notion d'agrivoltaïsme est apparue en 1981 en Allemagne, avec l'étude de la cohabitation d'une production électrique photovoltaïque et d'une production agricole. Mais de nombreuses pistes sont aujourd'hui possibles dans une logique de diversification et maintien de l'activité agricole, de création de revenus complémentaires, de soutien à une transition vers des cultures plus respectueuses de l'environnement et de préservation de la biodiversité.

Après avoir présenté les différentes technologies d'installations photovoltaïques au sol, nous faisons dans ce rapport une première description des pistes de compatibilité entre l'agriculture et le photovoltaïque au sol que nos travaux de recherche et nos retours d'expérience nous ont permis d'analyser :

- élevage animal : ovin, volailles (oies, poules, canards), chèvres naines,
- production de fourrage,
- horticulture :
 - culture maraîchère (légumes et fruits)
 - arboriculture (arbustes fruitiers), viticulture,
 - culture des fleurs, bulbiculture,
 - pépinière d'arbre
- apiculture
- aquaculture (ex : culture d'algues, élevage de poissons ou de crustacés, ostréiculture).

Ce rapport intermédiaire sera suivi d'un rapport avancé en 2021.



INTRODUCTION

ENCIS ENVIRONNEMENT cherche sans cesse à améliorer les protocoles et dispositifs expérimentaux ainsi que les outils de modélisation afin d'identifier des pistes techniques à mettre en œuvre pour améliorer la fiabilité des résultats. Les perspectives d'amélioration sont encore nombreuses, ainsi, l'équipe d'ENCIS consacre du temps à des projets de recherche et développement propres à l'entreprise, lui permettant de faire progresser ses prestations ainsi que la connaissance scientifique, en générale.

Depuis quelques années, les activités de RetD sont de plus en plus structurées, afin de leur donner plus d'envergure. Les objectifs sont les suivants :

- Développer les programmes de RetD autour des spécialités suivantes : l'écologie (chauves-souris, oiseaux, botanique), la transition énergétique et le climat dont les énergies renouvelables (éolien et photovoltaïque avant tout) l'eau, les sols et le paysage et le cadre de vie,
- Cibler les actions de RetD nécessaires et utiles à notre développement et l'amélioration de nos prestations,
- Intégrer ces avancées dans nos rapports et prestations existantes,
- Développer des prestations nouvelles par ces programmes RetD,
- Rédiger, le cas échéant, des articles ou rapports scientifiques,
- Diffuser nos résultats et articles dans des revues, colloques, et/ou sur notre page web dédiée à la RetD

1.1. Définition de la problématique et des hypothèses

1.1.1. *Sujet traité*

Les parcs photovoltaïques sont des installations de grande superficie qui permettent d'équiper des sites de grande production d'électricité à partir de l'énergie radiative du soleil. Ces installations solaires au sol ont subi un fort développement jusqu'en 2012 et le moratoire de cette activité par le gouvernement. Une forte reprise du développement est toutefois constatée depuis quelques années. Le développement des parcs solaires pose des questions sur la concurrence avec les autres usages du sol, comme l'agriculture, la sylviculture ou l'urbanisation. Après avoir mené une analyse sur les perspectives du déploiement des installations solaires au sol et de leurs incidences sur les autres affectations des sols, nous tenterons de déterminer les types de terrain les plus adaptés.

Parallèlement, nous analyserons la compatibilité avec les terrains les plus sensibles à cette concurrence. En particulier, ENCIS Environnement a entamé une analyse des solutions relatives à l'implantation de panneaux photovoltaïques sur des terres agricoles. Cette étude a pour vocation d'examiner la faisabilité de combiner l'activité agricole (voire aquacole) et la production d'électricité à partir du rayonnement solaire sur un même site, dans une logique de maintien de l'activité, de création de revenus complémentaires, et si possible de soutien à une transition vers des cultures plus respectueuses de l'environnement et de la biodiversité. Cette analyse se fait à partir :



- d'une analyse bibliographie,
- de retours d'expérience de parcs en France et à l'étranger qui combinent efficacement les activités agricole/horticole/aquacole et l'activité solaire,
- d'études de cas concrets avec des spécialistes avec lesquels des entretiens ont été menés :
 - un conseiller en écopastoralisme depuis 2011 dans l'Oise,
 - un exploitant en polyculture – polyélevage dans le Limousin,
 - une chef de projet photovoltaïque spécialisée en élevage dans l'Est de la France,
 - une chef de projet photovoltaïque spécialisée dans les cultures dans l'Est de la France,
 - un conseiller photovoltaïque et transition énergétique en Dordogne.
- et à partir des résultats de suivis écologiques de parcs solaires en exploitation afin d'y déterminer la régénération végétale.

Dans cette approche générale, plusieurs pistes de multifonctionnalité seront explorées :

- **élevage animal : ovin, volailles** (oies, poules, canards), chèvres naines,
- **production de fourrage**, ou autres cultures,
- **horticulture** :
 - **culture maraîchère (légumes et fruits)**
 - **arboriculture (arbustes fruitiers)**
 - culture des fleurs, bulbiculture,
 - pépinière d'arbre
- **apiculture**
- **aquaculture** (ex : serres photovoltaïques sur bassins de spiruline, élevage de poissons ou de crustacés, ostréiculture).

Dans ce premier rapport, les pistes explorées sont en gras dans la liste précédente. Ce rapport intermédiaire sera suivi d'un rapport avancé en 2021 qui sera complété par de nouveaux entretiens, de nouveaux retours d'expérience et la présentation d'autres bonnes pratiques.

1.1.2. Postulats et questions de départ à vérifier

Voici les questions auxquelles nous tenterons de répondre dans ce programme :

- Le développement des parcs photovoltaïques semble représenter une concurrence foncière notable vis-à-vis de l'agriculture, la sylviculture, les espaces naturels ou les espaces urbains. Mais qu'en est-il objectivement ? Quelle part de l'artificialisation globale représentent les espaces actuels et à venir des parcs solaires ? Qu'en est-il au regard des autres objets de l'artificialisation (espaces urbanisés, agro-carburants, routes et parkings, perte en SAU...) ?



- Quelles techniques de production d'énergie photovoltaïque en plein champ - voire avec serre - existent actuellement ? Offrent-elles des perspectives d'association avec une production agricole et aquacole ? Lesquelles peut-on recenser, existantes ou en devenir ?
- Quel est l'incidence de la présence des panneaux sur la photosynthèse et la pousse végétale ? Quelle est l'influence sur les rendements ? Quels sont les retours d'expérience des parcs en place ?
- Est-il possible de garantir un projet viable techniquement et économiquement, aussi bien d'un point de vue agricole que d'un point de vue de la production électrique ? L'une des deux productions se fait-elle au détriment de la seconde ?
- Quelles méthodes d'élevage ou culturales peuvent être mises en œuvre en agrivoltaïsme ? Faut-il adapter la technologie de production d'électricité en fonction d'un type de culture ou d'élevage ? De quelle manière ?
- L'agrivoltaïsme modifie-t-il le paysage et les perceptions sociales d'un territoire ?

1.2. Etat de l'art et bibliographie

Dans un premier temps, nous avons réalisé un état des lieux bibliographique pour démontrer ce que l'on apporte à l'état de l'art. En complément, des recherches sur la littérature grise (rapports institutionnels, sites internet, etc) ont été faites pour comprendre l'état actuel de la filière. La méthodologie s'appuie également sur les études d'impact de projets de parcs au sol ou de suivis environnementaux de parcs photovoltaïques réalisées par ENCIS Environnement au cours des dernières années.

L'agrivoltaïsme est actuellement un sujet de recherche en développement en corrélation avec le développement de l'énergie photovoltaïque au sol, les nécessaires mutations agricoles liées au dérèglement climatique et la multiplication des épisodes météorologiques extrêmes (orages, canicules, ...). Une synthèse de cette bibliographie est disponible au chapitre 3. Nous constatons qu'il existe de nombreux articles de journaux et documents de littérature grise, mais l'état de la recherche francophone sur le sujet est restreint. L'ensemble de la bibliographie est en annexe.



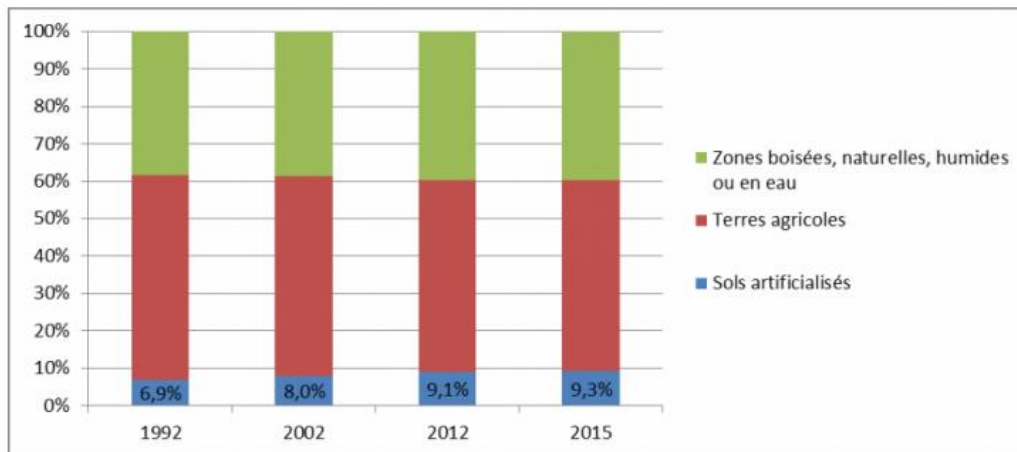
2. Concurrence des parcs photovoltaïques avec les usages des sols

Le développement des parcs photovoltaïques semble représenter une concurrence notable vis-à-vis de l'agriculture, la sylviculture, les espaces naturels ou les espaces urbains. Plus spécifiquement, les parcs photovoltaïques sont souvent accusés de « consommer » des espaces agricoles et d'être un facteur important de la réduction des surfaces dont la vocation première est de produire de l'alimentation. Mais quels sont objectivement les facteurs d'artificialisation des sols en France ? Quelle part de l'artificialisation globale représentent les espaces actuels et à venir des parcs solaires ? Qu'en est-il au regard des autres objets de l'artificialisation (espaces urbanisés, agro-carburants, routes, parkings, etc) ? Peut-on véritablement parler d'artificialisation lors de l'implantation d'une centrale photovoltaïque au sol ?



2.1. Un contexte national de diminution des terres agricoles

Selon Eurostats, en 2015, le territoire français métropolitain était occupé essentiellement par des **sols agricoles (51 %) et des sols boisés, naturels ou humides (39,7 %)**. Les **sols artificialisés (routes, voies ferrées, parkings, chemins, chantiers, terrains vagues, ...)** occupaient **9,3 % de la surface du territoire français** métropolitain. Comme on peut le voir sur le graphique suivant, **les espaces artificialisés augmentent au détriment des espaces agricoles.**



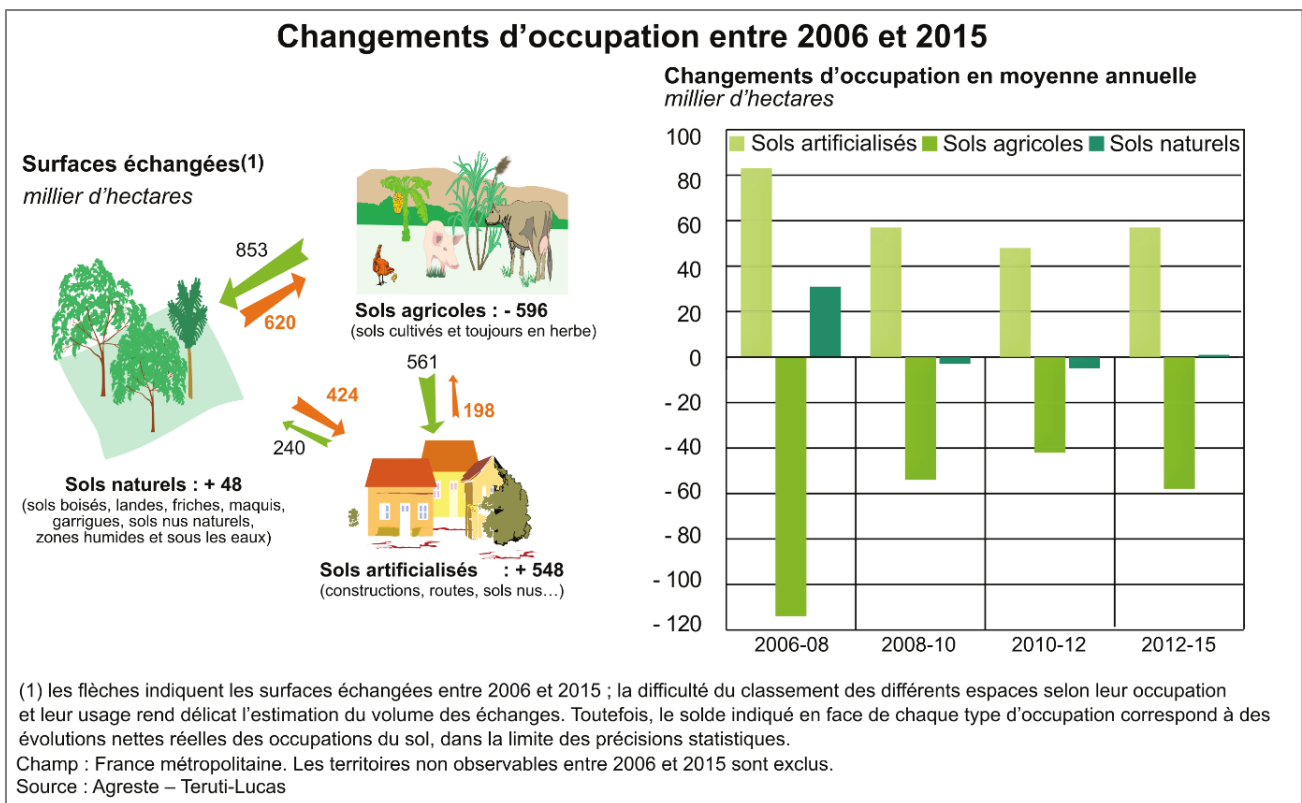
Évolution de l'artificialisation des sols en France – Eurostats

Les espaces artificialisés sont constitués pour deux tiers de sols imperméabilisés - des sols non bâtis comme les routes, les parkings, etc. et des sols bâtis - et pour un tiers de surfaces non imperméabilisées - essentiellement des sols enherbés en périphérie du bâti comme les jardins, les terrains de sport, les chemins de terre, des chantiers, etc. (Eurostats 2016)

Les autres sources (Corin land cover et Teruti-Lucas) convergent vers ce même constat que les terres agricoles reculent en France. **On comprend que la perte de terres agricoles est liée à deux facteurs. Grignotées par l'urbanisation, les parcelles agricoles laissent place à des voiries, des bâtiments, des équipements, des zones d'activités, etc, en périphérie des unités urbaines principalement. Le second facteur est moins évident, il s'agit de l'enfrichement de terres, qui ne sont plus exploitées et redeviennent forêts.**

L'enquête **Teruti-Lucas**, portée par le **Ministère de l'Agriculture**, a pour but de suivre et quantifier les changements d'occupation et d'usage des sols au fil du temps et de connaître annuellement les différentes catégories d'occupation du territoire (agricole, naturelle et urbanisée) aux niveaux national, régional et départemental. **Entre 2006 et 2015, 1 414 milliers d'hectares de sols agricoles ont changé de vocation : 561 000 ha sont devenus des sols artificialisés et 853 000 ha des sols naturels (landes, friches, espaces boisés)**. Dans une moindre mesure, des surfaces naturelles ou artificialisées sont devenues agricoles (Agreste 2020).

Au total, c'est un bilan de 548 000 ha de surfaces (agricoles et naturelles) qui ont été artificialisées entre 2006 et 2015, soit 55 000 ha par an en moyenne. Après un ralentissement entre 2008 et 2012, les pertes s'accroissent à nouveau sur la période 2012-2015.



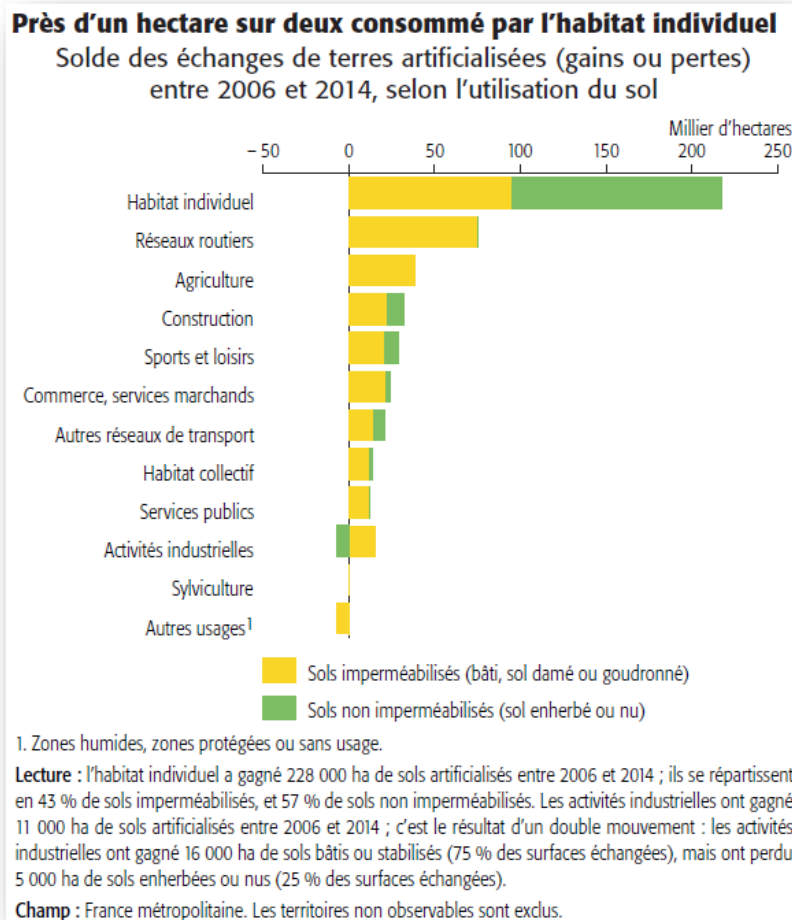
Changement d'occupation des sols entre 2006 et 2015 (Source : Agreste - Teruti-Lucas 2015)

L'artificialisation des terres entre 2006 et 2015 s'est faite principalement au détriment des terres agricoles. Ce constat peut s'expliquer par le fait que l'urbanisation se fait généralement à proximité des zones déjà artificialisées, où est pratiquée l'activité agricole. D'après l'Agreste, « *cette tendance concerne particulièrement les activités telles que la construction d'habitats individuels, de services publics et de zones d'activités industrielles qui se développent à plus de 70 % sur des terrains agricoles* ».

Si de nombreux facteurs interviennent dans l'artificialisation des sols, le principal est lié à la construction d'habitat individuel (46 % de l'artificialisation en 2014). Les autres postes majeurs sont les réseaux routiers (environ 16 %), les zones d'activité pour les services, les activités de travaux publics, industrielles, commerciales et artisanales réunies (près de 20 %), l'activité agricole avec les nouveaux



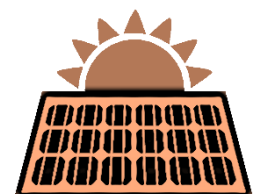
bâtiments, chemins et aires de stockage (8 %) ; viennent ensuite les équipements de sport et de loisirs et l'habitat collectif.



Facteurs d'artificialisation des sols à l'échelle nationale (Source : Agreste Primeur, numéro 326 – juillet 2015)

2.2. Les parcs photovoltaïques et l'artificialisation des sols

2.2.1. Une politique de préservation des terrains agricoles vis-à-vis des parcs solaires



Les parcs solaires au sol se développent depuis 2008, date à laquelle la première centrale de 500 kWc a été mise en service par le groupe VALECO à Lunel (34). **Dans un premier temps, les projets ont été rapidement fléchés vers des sites en reconversion pour éviter la concurrence décriée avec les sites agricoles.** Une circulaire du 18 décembre 2009 indique notamment qu'« une attention particulière [doit être portée] à la protection des espaces agricoles et forestiers existants ainsi qu'à la préservation des milieux naturels



et des paysages. Les projets de centrales solaires au sol n'ont pas vocation à être installés en zones agricoles, notamment cultivées ou utilisées pour des troupeaux d'élevage ».

Actuellement, cette ligne directrice est reprise dans les appels d'offre de la Commission de Régulation de l'Energie (CRE) portant sur la réalisation et l'exploitation d'installations de production d'électricité de l'énergie solaire. Les conditions d'admissibilité des projets prévoient que le terrain d'implantation doit se situer soit dans une zone urbanisée ou à urbaniser d'un PLU (zonage U ou AU) ou d'un POS (zonage U ou NA), soit dans une zone naturelle portant une mention spéciale pour la production d'énergie solaire (Npv, NEnr, ...). **Néanmoins, depuis quelques années, une recrudescence de projets photovoltaïques au sol de grande puissance concerne des terrains agricoles.**

Une première explication de ce contexte réside dans les conditions des derniers **Appels d'offre de la CRE qui ouvrent une catégorie pour les installations « innovantes »**. La famille de cet appel d'offre intègre en effet les installations agrivoltaïques. Au sens de cet appel d'offres, les installations agrivoltaïques sont des « *installations permettant de coupler une production photovoltaïque secondaire à une production agricole principale en permettant une synergie de fonctionnement démontrable. Dans ce cas, les innovations concerneront des systèmes photovoltaïques équipés d'outils et de services de pilotage permettant d'optimiser les productions agricole et électrique* ». Les installations agrivoltaïques sont éligibles en terrains agricoles quelle que soit leur implantation (sur serres, en plein champs...). **Toutefois, le volume appelé dans ce cas très particulier - et pour lequel la notion d' « innovation » reste difficile à justifier - est limité à 175 MW pour l'ensemble des trois périodes (2017, 2019 et 2020)**, alors que le volume pour l'appel d'offres des centrales au sol sur les 8 périodes est de 5 770 MWc. Le développement des centrales photovoltaïques en zones agricoles semble donc limité.

La protection des terrains agricoles a amené une autre évolution réglementaire : depuis 2016, tout projet envisagé sur des zones sensibles doit faire l'objet **d'une Etude Préalable Agricole** permettant d'évaluer l'intérêt agricole de la zone et d'estimer les incidences du projet sur l'activité agricole, avec le cas échéant, la mise en place de mesures de compensation collective pour soutenir l'activité agricole du territoire.

Pourtant, dans la réalité, de grands volumes sont en développement en 2020. Les parcs au sol sur terrains agricoles permettent d'envisager des superficies très importantes qui sont la condition d'économies d'échelle nécessaires à la compétitivité de la filière. Des solutions technologiques favorisant une meilleure compatibilité avec l'élevage ou l'horticulture sont en devenir. Ces facteurs incitent les acteurs de la filière à croire en ce débouché malgré un cadre actuel contraignant. **De nombreux projets prévoient une modification du zonage du document d'urbanisme pour pouvoir candidater à un appel d'offre de la CRE.** Des surfaces agricoles se voient donc muter en zones naturelles Npv ou NEnr au sein des documents d'urbanisme pour pouvoir y installer un parc photovoltaïque. **D'autres projets sont envisagés en privilégiant une vente de l'électricité de gré à gré ou en Power Purchase Agreement (PPA), c'est à-dire en dehors du cadre des Appels d'offres tarifaires de la CRE.**



2.2.2. Superficies occupées par les parcs solaires et objectifs de développement

Sait-on quelles sont les superficies actuelles occupées ?

Si les centrales photovoltaïques au sol constituent une technologie mûre et compétitive financièrement, elles présentent de prime abord le désavantage d'être consommateurs d'espace au sol. En effet, bien que plusieurs types de technologies existent (cf. Chapitre : 4.1) et que les rendements surfaciques s'améliorent, nous pouvons établir que **la superficie nécessaire à l'installation d'1 MWc est désormais de 1 à 1,5 ha**. En 2010, elle était plutôt de 2 ha. Selon la latitude, l'orientation, l'inclinaison et les masques présents, une centrale de 1 MW sur 1 ha permettra de produire 1 000 à 1 600 MWh. Soit l'équivalent des besoins en électricité d'environ 1 000 à 1 600 personnes (hors chauffage et eau chaude). Les parcs au sol peuvent avoir une emprise de quelques milliers de m² à plusieurs centaines d'hectares.

La puissance du parc solaire photovoltaïque atteint 10,3 GW fin juin 2020.

D'après Solagro (janvier 2020), le parc français est composé de :

- 50 % parcs et ombrières
- 40 % grandes toitures
- 10 % diffus + toitures < 100 KWc

Cela représente donc environ 5 GW de centrales au sol et ombrières. Cette donnée est corroborée par les données statistiques (Tableau de bord : solaire photovoltaïque Premier trimestre 2020 – n°297 – Juin 2020) dans lequel les centrales de plus de 250 kW – soit les très grosses toitures, les parcs au sol et les plus grandes installations d'ombrières – représentent 53 % de la puissance du parc français.

| Tranches de puissance | Parc au 30 juin 2020-Nombre d'installations | | |
|-----------------------|---------------------------------------------|-------------------|----------------|
| | Nombre d'installations | Puissance (en MW) | dont métropole |
| ≤ 3 KW | 323 438 | 873 | 865 |
| > 3 et ≤ 9 KW | 96 352 | 606 | 601 |
| > 9 et ≤ 36 KW | 20 575 | 507 | 469 |
| > 36 et ≤ 100 KW | 18 654 | 1 557 | 1 521 |
| > 100 et ≤ 250 KW | 7 238 | 1 311 | 1 262 |
| > 250 KW | 1 774 | 5 417 | 5 131 |
| Total | 468 031 | 10 270 | 9 851 |

D'après l'ADEME (2019)¹ la part des centrales au sol à la fin 2015 s'élevait à 35 % de la puissance totale installée. Aujourd'hui, les nouvelles capacités photovoltaïques seraient installées pour moitié au sol.

Si l'on s'en tient à ces derniers indicateurs, les centrales solaires au sol représentent de 35 à 50 % de la puissance installée du parc français, c'est-à-dire de 3 500 MW à 5 036 MW. Cela représente donc l'équivalent de 5 250 ha à 7 500 ha pour un ratio de 1,5 ha par MWc.

¹ ÉVALUATION DU GISEMENT RELATIF AUX ZONES DELAISSEES ET ARTIFICIALISEES PROPICES A L'IMPLANTATION DE CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES, Avril 2019, ADEME en partenariat avec Trans énergie et Ingeos

Un très grand nombre de ces centrales a été implanté sur des zones délaissées et artificialisées comme la politique nationale l'a orienté. Une plus petite partie a toutefois concerné des terrains agricoles. Aucune donnée officielle ne semble établir clairement la part de ces terrains agricoles (cf. 2.2.4).

Perspectives de superficies occupées ?

Fin juin 2019, la production du parc photovoltaïque français a seulement permis d'alimenter 2,5 % de la consommation énergétique du pays. Le parc solaire a donc vocation à se développer encore fortement.

En effet, les objectifs nationaux de la Programmation Pluriannuelle de l'Energie, prévoient de passer de 9,9 gigawatts (GW) de solaire à fin 2019 à 35,1 à 44 GW en 2028, tous sites confondus (sols, toitures, ombrières...), grâce aux appels d'offre CRE et aux tarifs de rachat pour les centrales en toiture. Cela pourrait représenter une surface approximative de 30 000 ha à 40 000 ha pour les parcs au sol, selon COLLET (2020). La PPE indique une fourchette de 33 000 à 40 000 ha de centrales au sol pour 20.6 à 25 GW installés, en maintenant la volonté de privilégier les terrains urbanisés et dégradés. Il est bien sûr difficile d'imaginer précisément la part future des espaces agricoles mais on peut estimer qu'elle se situera entre 10 et 50 % des superficies utilisées.



Objectif d'augmentation des capacités installées de production photovoltaïque et mesures pour les atteindre

Le tableau reprend les objectifs dont se dote la PPE. Ces objectifs correspondraient en 2028 à une surface de PV installée en France entre 330 et 400 km² au sol et entre 150 et 200 km² sur toiture (contre 100 km² au sol et 50 km² sur toitures).

| | 2016 | PPE 2016 objectif 2018 | 2023 | 2028 |
|----------------------------|------|------------------------|------|-------------|
| Panneaux au sol (GW) | 3,8 | 5,6 | 11,6 | 20,6 à 25 |
| Panneaux sur toitures (GW) | 3,2 | 4,6 | 8,5 | 14,5 à 19,0 |
| Objectif total (GW) | 7 | 10,2 | 20,1 | 35,1 à 44,0 |

Mesures :

- Favoriser les installations au sol sur terrains urbanisés ou dégradés, ou les parkings, afin de permettre l'émergence des projets moins chers tout en maintenant des exigences élevées sur les sols agricoles et l'absence de déforestation ;
- Conserver la bonification des terrains dégradés, qui permet de limiter la consommation des espaces naturels ;
- Mettre en œuvre les mesures adoptées le 28 juin 2018 à l'issue du groupe de travail solaire dont en particulier :
 - Faciliter le développement du photovoltaïque pour les Ministères, les établissements publics (SNCF, Ports etc.) et les détenteurs de foncier anthropisé (grande distribution, logistique etc.) ;
 - Faciliter le développement du photovoltaïque sur les parkings (simplification des mesures d'urbanisme pour les ombrières de parking) ;
 - Soutenir les collectivités locales, notamment au travers du réseau « Villes solaires » ;
 - Permettre une meilleure intégration du solaire dans le patrimoine architectural français ;
- Adopter le calendrier d'appel d'offres ci-dessous correspondant à 2 GW par an pour les centrales au sol et 0,9 GW par an pour les installations sur grandes toitures ;
- Maintenir un objectif de 300 MW installés par an pour les installations sur petites et moyennes toitures (inférieures à 100 kWc) en orientant les projets vers l'autoconsommation, dynamiser le développement des projets sur la tranche 100-300 kWc en les rendant éligibles au guichet ouvert et accélérer le développement des projets sur les grandes toitures (>300 kWc) ;
- Soutenir l'innovation dans la filière par appel d'offres, pour faire émerger des solutions innovantes, notamment agrivoltaïques permettant une réelle synergie entre la production agricole et l'énergie photovoltaïque, en maintenant les volumes de l'appel d'offres actuel (140 MW/an).

Le calendrier ci-dessous marque les trimestres où un appel d'offres sera lancé pour les centrales au sol à hauteur de 1 000 MW par période.

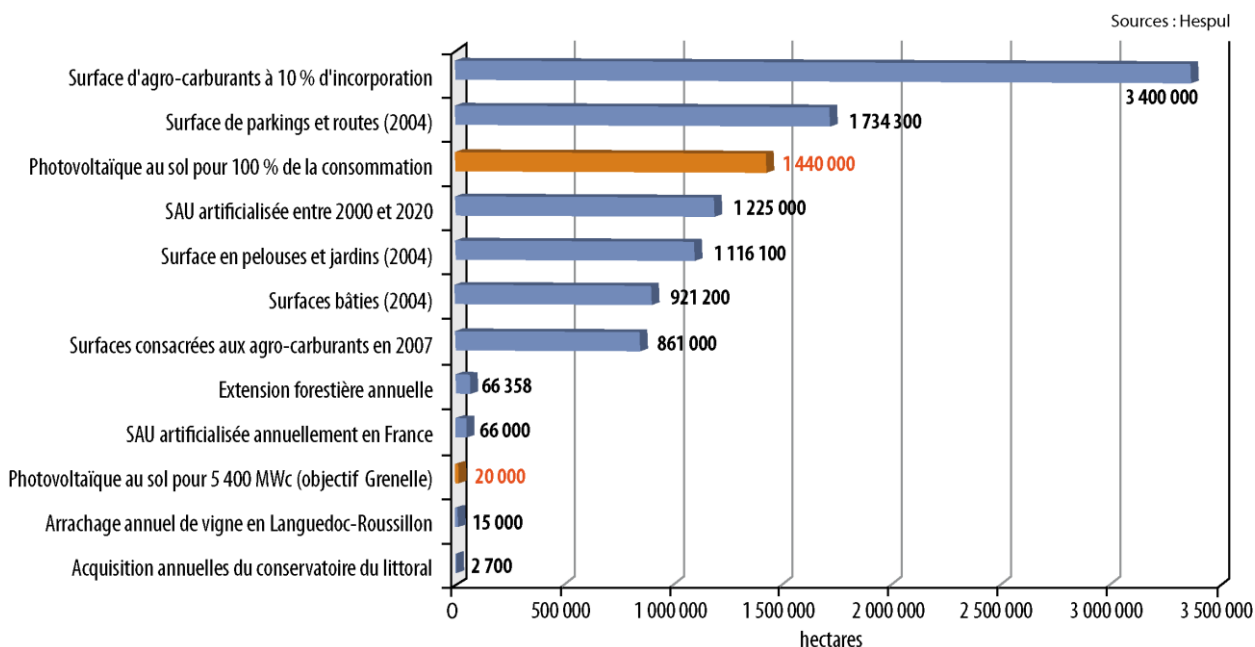
Objectif d'augmentation des capacités installées de production photovoltaïque et mesures pour les atteindre (source : Programmation Pluriannuelle de l'Energie, 2020)



Comparaison aux autres facteurs d'artificialisation

33 000 à 40 000 ha de terrains consacrés à la production photovoltaïque : cela peut sembler des surfaces très importantes pour produire **7 % du mix électrique français**. Il est néanmoins **intéressant de comparer l'emprise au sol du photovoltaïque avec d'autres activités**.

En 2009, d'après une analyse de l'association HESPUL, la concurrence des parcs solaires en plein champs est à relativiser. Cette étude réalisée en 2009 date, mais force est de constater que les ordres de grandeur restent intéressants. Partant des objectifs de l'époque, soit 5 400 MWc pour 2020 établis au Grenelle 2009, « *si la proportion des parcs photovoltaïques au sol venait à représenter 50 % de la puissance cumulée en 2020, cela représenterait toujours moins de 0,15 % de la surface agricole non cultivée (...) si les parcs photovoltaïques venaient à remplir à eux seuls la totalité de l'objectif de 5 400 MWc, ils occuperaient au total une superficie de l'ordre de 20 000 à 25 000 hectares de terrains, qui de plus ne seraient pas nécessairement agricoles.* » De la même manière, les 20 000 ha nécessaires pour l'installation de ces 5 400 MWc seraient à relativiser face aux 66 000 ha de la SAU (Surface Agricole Utile) artificialisée chaque année sur cette période (avancée des zones urbanisées et industrielles principalement). Bien que les agrocarburants ne soient pas une artificialisation en soi, la comparaison a aussi été faite avec ce type d'énergie : 5 400 MWc de photovoltaïque au sol représentent une superficie 43 fois inférieure aux surfaces consacrées aux agro-carburants en 2007. Plus largement, la SAU française est de 29 millions d'hectares. Proportionnellement, les objectifs du Grenelle 2009 ne représentaient alors que 0,07 % de la SAU (HESPUL).



Etat et évolutions de l'occupation du sol en France (2009)

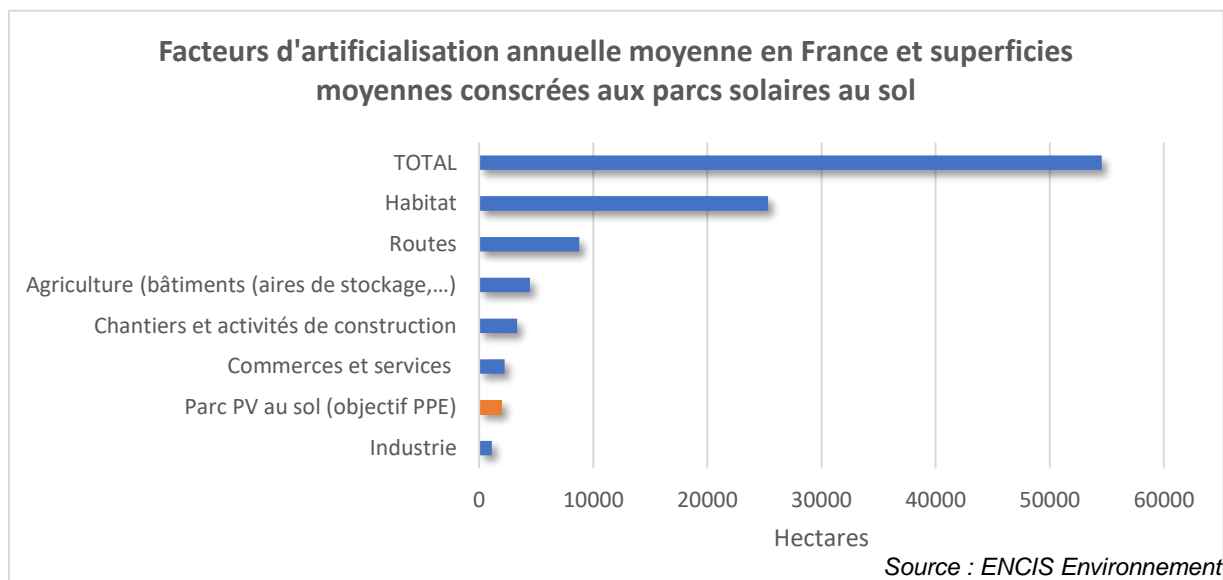
De façon plus actuelle, l'objectif maximum de la PPE en 2028 étant de 25 GW au sol, soit d'après eux 40 000 ha, il représente une part minime de la Surface Agricole Utile (SAU) et des surfaces artificialisées globales.



- La SAU représente 29 millions d'ha. Les **40 000 ha de photovoltaïque au sol** seraient donc l'équivalent de **0,14 % de la SAU**.
- Les surfaces artificialisées représentent 9,3 % du territoire français en 2018, soit 5 100 000 ha. Les **40 000 ha de centrales au sol** représenteraient donc **0,8 % de surfaces artificialisées**.

Si l'on considère que l'objectif de la PPE en centrales solaires au sol aura été atteint entre les années 2008 (date de la première centrale française à Lunel) et 2028, cela implique **une artificialisation de 2 000 ha par an pour le solaire que l'on peut comparer aux principaux facteurs d'artificialisation (Teruti-Lucas 2006 à 2014) ramenés à une moyenne annuelle²** :

- 55 000 ha par an en moyenne d'artificialisation globale, soit 3,6 %,
- 25 000 ha par an pour des maisons individuelles avec leurs jardins, soit 8 %,
- 9 000 ha par an pour les réseaux routiers, soit 22 %,
- 4 500 ha par an pour la création de nouveaux bâtiments, d'aires de stockage ou de chemins d'exploitation pour l'agriculture, soit 44 %.



Facteurs d'artificialisation annuelle moyenne des sols en France (d'après Teruti-Lucas 2006 à 2014) et superficie moyenne consacrée aux parcs solaires au sol entre 2008 et 2028 (objectif PPE)

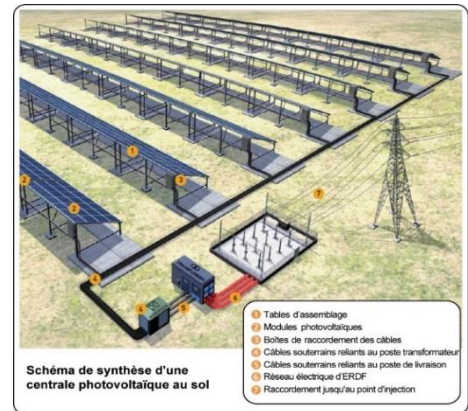
² Part des 2000 hectares de photovoltaïque au sol (moyenne annuelle des objectifs) rapportée au nombre d'hectares par catégorie (artificialisation globale, maisons individuelles, routes...).

2.2.3. Sols imperméabilisés ou non imperméabilisés ? telle est la question !

En 2014, 2/3 des sols artificialisés sont imperméabilisés. Mais qu'en est-il finalement des parcs solaires au sol ? Ils sont souvent accusés de consommer de l'espace agricole, et le terme consommation sous-entend le caractère irréversible des opérations sur le foncier. Or, la majorité des infrastructures agrivoltaïques sont pensées de façon à leur attribuer un potentiel réversible et ainsi la possibilité de recouvrir une parcelle exploitable de façon "conventionnelle".

Les composantes d'un parc au sol sont :

- des tables ou trackers de champs photovoltaïques
- une clôture sécurisée, une citerne incendie
- des pistes de concassé pour la circulation des véhicules lors des travaux et de la maintenance
- des postes de transformation de l'énergie, un poste de livraison de l'énergie



L'occupation des sols dépend du type de structure choisi par l'opérateur. **La couverture du sol dans un parc photovoltaïque classique (structure fixe orientée vers le sud) n'est pas intégrale : seulement un tiers à deux tiers de la superficie est occupée par les panneaux.** Des inter-rangs sont respectés pour limiter l'ombrage des panneaux les uns sur les autres, des voies d'accès sont également aménagées dans des matériaux perméables³, des zones de protection entre les clôtures et les panneaux sont souvent indispensables pour respecter les règles de lutte contre l'incendie, etc. La conception des structures de panneaux permet de fortement réduire les effets d'imperméabilisation des sols ainsi que la création de rigoles. La faible largeur des rangées (en général 2 à 4 m), l'espace entre les rangées (en général 2 à 4 m) et l'espacement entre les modules (2 cm environ) permettent à l'eau de s'écouler et de se diffuser sur l'ensemble de la parcelle. **L'artificialisation nette d'un parc photovoltaïque reste donc limitée et réversible (ADEME 2018).** Certains types d'installations moins conventionnelles peuvent avoir toutefois un grand taux de couverture et d'artificialisation : serres solaires, tables fixes dans un axe nord/sud, etc.



Différences d'occupation du sol entre des tables orientées au sud et des tables est-ouest

³ Selon les cas et les recommandations du SDIS, il peut y avoir des pistes externes faites en matériaux empêchant la propagation d'incendie, pouvant ainsi imperméabiliser le sol



2.2.4. Des zones délaissées aux zones agricoles

Comme indiqué précédemment, un parc solaire représente généralement une occupation de plusieurs hectares, voire plusieurs dizaines d'hectares. La politique nationale légitime les sites de délaissés artificialisés afin d'éviter la concurrence directe avec l'agriculture et la sylviculture, et d'offrir une seconde vie à ces sites.

Les types de **terrain qui semblent les plus cohérents** sont :

- les **friches industrielles** polluées ou non (ex : anciens dépôts d'hydrocarbures, ateliers mécaniques, anciennes usines à gaz, sites de stockage de pneus, etc),
- les zones **d'activités économiques ou de loisirs** dont le sol a été décapé, voire viabilisé, mais qui sont aujourd'hui **désaffectées** pour faute de preneur ou de déprise économique,
- les **anciennes installations de stockage de déchets et décharges**,
- les **anciens terrils de mine**,
- les **carrières en fin d'exploitation**,
- les **friches de sites militaires**,
- les **zones délaissées liées aux infrastructures** (ferroviaires, autoroutières, aéroportuaires, etc)

Une étude commandée par l'ADEME en 2019⁴ nous apprend que le potentiel théorique de ce type de sites est très important. Cette étude propose une estimation du potentiel des zones délaissées et parkings pour l'installation de centrales photovoltaïques en France métropolitaine et Corse à partir d'un travail cartographique et des bases de données nationales BASIAS, BASOL (anciens sites industriels potentiellement pollués) et IGN Topo (parkings). D'après cette estimation, 53 GWc pourraient être installés sur les 17 764 sites retenus par l'étude, dont **49 GWc pour des parcs au sol**, le reste en ombrières. Cela dépasse certes l'objectif de 25 GW en 2028 de la PPE, **néanmoins cette modélisation est à prendre avec des pincettes**. Seuls 18 % des sites ne sont pas concernés par des contraintes handicapantes pour le développement d'un projet (proximité d'un monument historique, d'un aéroport, protection écologique, périmètre d'un captage d'eau, etc.). 70% des sites présentent une taille très modeste ne permettant pas de puissance supérieure à 2,5 MWc, ce qui est souvent pénalisant au regard des économies d'échelles nécessaires liées aux frais de raccordement électrique. Les coûts de dépollution sont aussi parfois difficiles à absorber dans l'investissement global. Enfin, les propriétaires de ces sites peuvent choisir une reconversion urbaine (habitat, zone d'activité, etc) plutôt qu'une seconde vie vers le photovoltaïque. **Le gisement théorique est donc prometteur, mais la réalité du développement de ce type de projets sera tout autre. Le photovoltaïque sur terrains agricoles ne peut donc pas être exclu pour atteindre l'objectif de 25 GW de centrales au sol.**

Aucune donnée officielle ne semble établir clairement la part actuelle de ces terrains agricoles dans le parc solaire français. D'après une extrapolation des données de l'appel d'offres CRE 3, les parcs au sol couvrent

⁴ ÉVALUATION DU GISEMENT RELATIF AUX ZONES DELAISSEES ET ARTIFICIALISEES PROPICES A L'IMPLANTATION DE CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES, Avril 2019, ADEME en partenariat avec Trans énergie et Ingeos

un peu moins de **500 hectares de terres d'origine agricole** (SOLAGRO, 2020)⁵. D'après une étude réalisée par l'ADEME, « *les centrales PV au sol concerneraient en 2015 de l'ordre de 450 ha de foncier productif⁶* », ce qui représente une très faible superficie des surfaces agricoles disparues ces dernières années, en comparaison avec l'urbanisation (ADEME 2018).

Les parcelles agricoles représenteraient donc de 10 à 14 % des parcs au sol en 2015. Un taux somme toute relativement faible pour l'instant à priori.

Cependant, au vu de la volonté nationale de développer la production photovoltaïque et de la disponibilité finalement relative des zones de « reconversion », la superficie des parcs photovoltaïques pourrait largement s'étendre sur des zones agricoles et naturelles au cours des prochaines années.

On constate d'ailleurs depuis 2018, un fort intérêt de la filière pour l'agrivoltaïsme qui a pour vocation de combiner la production électrique et la production agricole.



Illustration de la concurrence avec les terrains agricoles en Espagne (source : Imbert)

⁵ Les parcs solaires photovoltaïques au sol consomment-ils des terres agricoles ? SOLAGRO, pour Enercoop, Energie Partagée et Terre de liens, 2020

⁶ ADEME - Agriculture et énergies renouvelables : contributions et opportunité pour les exploitations agricoles, 2018

3. Historique de la R&D en agrivoltaïsme dans le monde

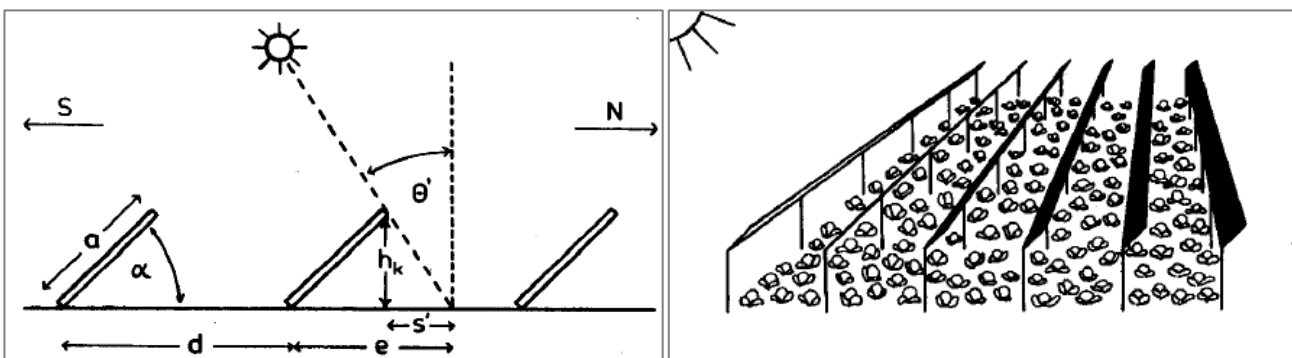
Les parcs au sol sont souvent considérés comme une concurrence à l'activité agricole, déjà menacés par les autres formes d'artificialisation. Nos systèmes alimentaires ainsi que nos systèmes énergétiques sont vulnérables au changement climatique. L'implantation de **solutions multifonctionnelles** photovoltaïque/agriculture pourrait-elle permettre une **meilleure résilience** de ces systèmes alimentaires, voire même des centrales solaires ?

Le concept de l'agrivoltaïsme fait son chemin depuis de nombreuses années, pour devenir aujourd'hui un défi fondamental de la transition énergétique. Cette thématique est aussi un terrain de recherche scientifique. Plusieurs recherches et analyses portent sur les « hybrides d'agriculture colocalisée et d'infrastructure solaire photovoltaïque (PV) ». Dans ces études de nombreux facteurs doivent être étudiés tels que :

- les conditions microclimatiques,
- la température des panneaux photovoltaïques,
- l'humidité du sol et l'utilisation de l'eau d'irrigation,
- la fonction écophysiological des plantes
- et la production de biomasse végétale dans cet écosystème "agrivoltaïque".

Il a pu être constaté que l'ombrage des panneaux photovoltaïques peut offrir des avantages additifs et synergiques, notamment une réduction du stress des plantes lié à la sécheresse, une plus grande production alimentaire et même une réduction du stress thermique des panneaux photovoltaïques (Barron-Gafford et al. 2019).

La notion d'agrivoltaïsme est apparue pour la première fois en 1981. Adolf Goetzberger et Armin Zastrow étudiaient pour la première fois la cohabitation d'une production électrique photovoltaïque et une production agricole. Une configuration type était proposée : panneaux à deux mètres du sol, espacés d'au moins trois fois leur hauteur, inclinaison des panneaux correspondant à la latitude. Cette configuration a permis d'établir que le rayonnement obtenu est presque uniforme sur la journée et qu'il correspond à 2/3 du rayonnement global sur une parcelle témoin (GOETZBERGER, ZASTROW 1981).



Illustrations de l'article *On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation* (GOETZBERGER, ZASTROW 1981)

La valorisation de l'espace inter-rangée était alors envisagé, en privilégiant des espèces dont la croissance ne sera pas limitée par une insolation plus faible, comme le seigle, l'orge, l'avoine et les betteraves sucrières. Cette étude considère également le pâturage d'un parc photovoltaïque par du bétail (mouton) comme une possibilité intéressante. Adolf Goetzberger a ensuite poursuivi ses recherches qui ont servis de base à l'agrivoltaïsme avec la culture de pommes de terre sous panneaux.

Après une longue période sans réel développement, cette idée à la base visionnaire prend de l'ampleur. Les systèmes de cultures sous panneaux solaires « montés » actuels suggèrent qu'une mise en œuvre efficace des systèmes d'agro-photovoltaïsme pourraient également devenir réalité.

C'est **au Japon que s'est développé l'agrivoltaïsme à partir de 2004**. Akira Nagashima a été le premier à étudier l'incidence du niveau d'éclairement sur la photosynthèse. Le taux de photosynthèse augmente avec le niveau d'éclairement, jusqu'à un « point de saturation de la lumière », à partir duquel la quantité accrue de lumière n'influe plus sur la photosynthèse. Il envisage alors une possibilité d'exploiter ce surplus de lumière inutile aux plantes. Pour cela, il conçoit des structures aisément démontables afin de les tester sur différentes cultures et de l'élevage.



Photo des installations de Akira Nagashima (source : Junko Movellan)

Les premiers projets voient ainsi le jour au Japon. Il s'agit de structures démontables pour tenir compte de la rotation des cultures et permettre aux agriculteurs de les retirer et les déplacer facilement. De nombreuses cultures sont ainsi concernées (agrumes, arachides, aubergines, concombres, ...). La législation japonaise impose que les agriculteurs maintiennent une production agricole d'au moins 80 % sur les parcelles concernées.

En Europe, les serres agrivoltaïques voient le jour au début des années 2000. C'est en Autriche que les premiers panneaux solaires mobiles sont installées après 4 ans de recherche. Ce premier parc de plein champ comprend des panneaux suspendus à **plus de 5 mètres de hauteur** et soutenus par des câbles.

En France, les installations en plein champ se développent à partir de 2008. La question de l'entretien et de la valorisation de ces parcs se pose alors. Sur les terres ayant un potentiel agricole (terrains non dégradés tels que les anciennes carrières, les anciennes décharges, ...), **le pâturage par les moutons offre le double avantage d'entretenir les terrains à un coût plutôt modéré et de permettre un maintien de l'activité agricole. Néanmoins les projets se limitent souvent plus à un entretien du couvert végétal qu'à une réelle exploitation ovine. La concurrence du solaire avec l'agriculture a été décriée et la réglementation a sévi à l'issue du moratoire sur les tarifs de rachats photovoltaïques.** Depuis déjà quelques années les chambres

d'agriculture et les acteurs de la filière recherchent les compatibilités entre les différentes filières agricoles et les parcs photovoltaïques.



Centrale en plein champs en Espagne en 2008 (source Imbert)

En Allemagne, la double utilisation des terres pour la « récolte » de l'électricité solaire et l'agriculture a été testée par le Fraunhofer Institut en 2017-2018 dans le cadre du projet commun "Agro photovoltaïque - Utilisation efficace des ressources des terres (APV-RESOLA)". Sur un tiers d'un hectare de terre arable près du lac de Constance en Allemagne, des modules photovoltaïques d'une puissance totale de 194 kilowatts sont installés sur une structure de cinq mètres de haut (cf. 5.2.2). L'ombrage partiel sous les modules photovoltaïques a amélioré le rendement agricole, et l'été très ensoleillé a augmenté la production d'électricité solaire. Les résultats ont montré une efficacité d'utilisation moyenne des terres de 160 % (**Schindele 2019**). **La valeur de l'électricité produite par l'énergie solaire couplée à la production de cultures tolérantes à l'ombre a créé une augmentation de plus de 30 % de la valeur économique des exploitations agricoles déployant des systèmes agrivoltaïques par rapport à l'agriculture conventionnelle.** L'utilisation de cultures tolérantes à l'ombre permet, en plus, de minimiser les pertes de rendement des cultures et donc de maintenir la stabilité du prix des récoltes (Dinesh, Pearce 2016).

En parallèle, de nombreuses études ont été menées pour étudier la compatibilité des parcs photovoltaïques avec différentes pratiques culturales. L'agrivoltaïsme est la combinaison de panneaux photovoltaïques et de cultures (ou d'élevage) sur une même unité de terre, c'est donc une alternative qui a pour but d'atténuer la concurrence foncière entre les deux filières. Pourtant ces deux productions doivent rester productives. C'est pourquoi **le choix de l'espèce à cultiver, son itinéraire technique mais également la**



disposition et le modèle de panneaux photovoltaïques doivent être réfléchis pour la meilleure synergie possible (Marrou et al. 2013).

L'étude de l'allemand Maximilian Trommsdorff, nous démontre qu'il y a **une réelle rentabilité qui peut être créée à intégrer des cultures sous des panneaux au sol ou encore surélevés de plusieurs mètres**. Le coût d'investissement de départ est le plus gros frein pour le moment. Cela est d'autant plus vrai avec les systèmes dits « spécifiques » ou « mobiles » permettant de choisir le niveau d'ensoleillement fourni aux cultures selon leur besoin, et donc de découpler les productions électrique et agricole, qui ont aussi les coûts les plus élevés (Trommsdorff 2016).

Actuellement, la communauté scientifique, souvent associée aux exploitants et aux industriels est de plus en plus prolifique sur le sujet de l'agrivoltaïsme. Pour preuve, en 2019 et 2020 se sont tenus de nombreux colloques ou webinaires sur le sujet, dont les plus notables :

- AgriVoltaics2020, conférence et exhibition, 14-16 octobre 2020,
- INES, Solaire, transition agricole et énergétique, les conditions de la réussite, 5 novembre 2019,
- Office franco-allemand pour les énergies renouvelable, Séminaire sur l'agrivoltaïsme en France et en Allemagne, 12 octobre 2018.

Des résumés du colloque AgriVoltaics2020 sont en annexe.

Dans la suite de ce document, nous détaillerons les différentes techniques existantes permettant d'allier productions électrique et agricole sur un même site.



4. Solutions technologiques adaptées à l'agrivoltaïsme



D'une manière générale, les installations au sol de production d'électricité à partir du rayonnement solaire varient en fonction :

- **du type de structure portante** : fixe ou équipée de dispositif de suivi du soleil,
- **du type de modules** : cristallins ou couches minces, opaques ou translucides, mono-faciaux ou bi-faciaux,
- **de l'espacement nécessaire entre les tables ou structures,**
- **de la hauteur par rapport au sol.**

Ces facteurs ont des incidences sur le taux d'occupation du sol au regard de la puissance installée, sur la production d'électricité, sur l'investissement, ainsi que **sur la compatibilité avec une activité agricole.**

En effet, **selon la technologie choisie, la co-production sera plus ou moins optimisée** :

- **liberté de circulation des agriculteurs et des engins** sous ou entre les panneaux,
- **hauteur des structures adaptées à la taille des plants végétaux ou des animaux,**
- **microclimat créé sous les panneaux** :
 - taux d'ensoleillement en fonction du type de module et de la hauteur des panneaux,
 - régulation de la température derrière les panneaux,
 - régulation de l'évaporation et l'évapotranspiration des plantes et donc une meilleure rentabilité/gestion hydrique : moins de perte d'eau
 - protection contre les intempéries (grêle, pluie),
 - adaptation de serres sur les structures,
 - adaptation de systèmes d'irrigation sur les structures,
 - etc.

4.1. Conception des centrales photovoltaïques les plus courantes

Nous inventorions **quatre types de centrales au sol les plus souvent rencontrées en France** :

- **Les centrales solaires fixes** :
 - **Tables dans un axe est/ouest avec des panneaux fixes orientés vers le sud**
 - **Tables fixes dans un axe nord/sud, avec des panneaux orientés est et ouest**
- **Les centrales solaires équipées de dispositif de suivi du soleil (ou trackers)**
 - **Tables avec un tracker 1 axe permettant d'orienter les panneaux de l'est à l'ouest (axe nord/sud) ou de les incliner de 0 à 90°**
 - **Tables photovoltaïques sur pylône ou sur plot avec un tracker deux axes orientant la table pour optimiser l'azimut et l'inclinaison**

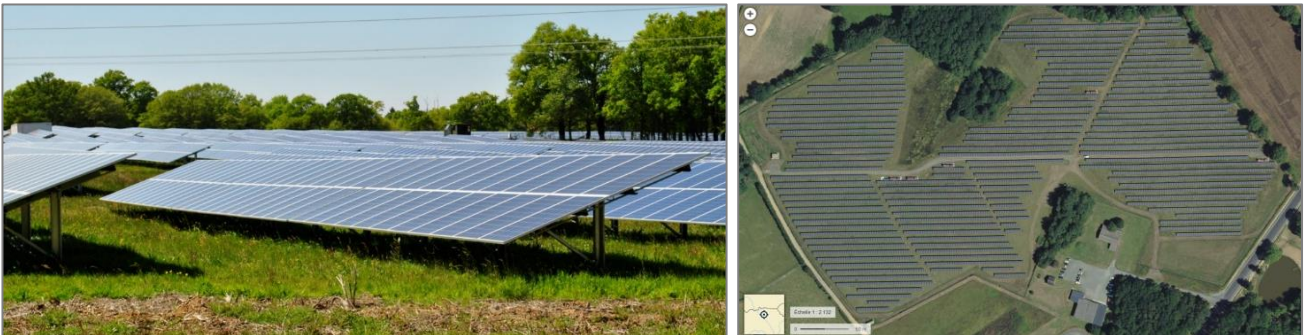
D'autres types de structures font leur apparition sur le marché en lien avec l'agrivoltaïsme, comme par exemple : **les serres photovoltaïques avec modules translucides, les structures coulissantes, les structures élevées, les panneaux verticaux équipés de modules bifaciaux**, etc.

Les installations qui possèdent des structures plus importantes, avec des fondations plus profondes ou avec des systèmes électroniques de type trackers ont des coûts plus élevés. Pour rester viables économiquement, elles doivent présenter l'avantage d'un surplus de production électrique ou d'une combinaison avec une activité agricole.

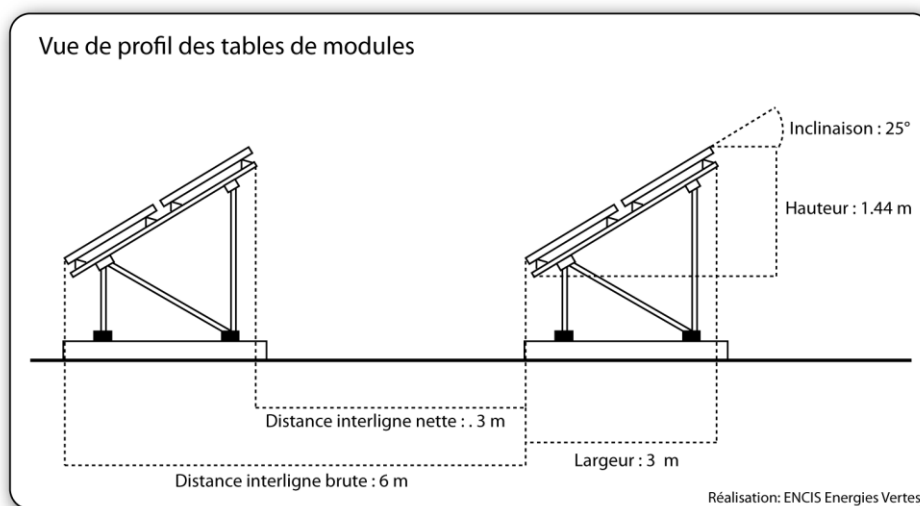
4.2. Centrales solaires fixes conventionnelles

4.2.1. Tables basses orientées vers le sud

Les centrales équipées de tables dans un axe est/ouest avec des panneaux fixes orientés vers le sud sont le plus standards. Cette configuration nécessite un espace entre les rangées de panneaux pour limiter les ombrages créés par le point haut de la table de devant. Les tables sont de largeurs (2 à 4 m) et de hauteur (2 à 5 m) variables. Ces configurations permettent le pâturage d'animaux ou la culture de fourrages, fruits et légumes en inter-rangs. Des infrastructures complémentaires peuvent être adaptées (tunnels plastiques, récupération de l'eau, circuit d'arrosage, etc.). Le coût de ce type d'installation est compétitif.



Parc solaire de Grateyrolles (Source : ENCIS Environnement et Géoportail)



Exemple de coupes (Source : ENCIS Environnement)

4.2.2. Tables fixes avec des panneaux orientés est et ouest

Certains parcs sont configurés de manière à optimiser le ratio superficie occupée/puissance installée. Les tables, plutôt nord-sud dans la longueur, supportent des champs de modules orientés d'un côté vers l'est et de l'autre vers l'ouest. La densité de l'installation étant supérieure aux précédentes, ces centrales limitent le passage de la lumière et le ruissellement de l'eau de pluie vers le sol, sauf à utiliser des modules translucides et les espacer afin de laisser passer l'eau.

Ce type de configuration, avec des adaptations (modules transparents, hauteur des structures, etc.) peut abriter des élevages d'animaux (ex : volailles) et des fruitiers. Le coût de ce type d'installation est relativement compétitif.



Cestas, la plus grande centrale française (Source : Google Map et NEOEN)



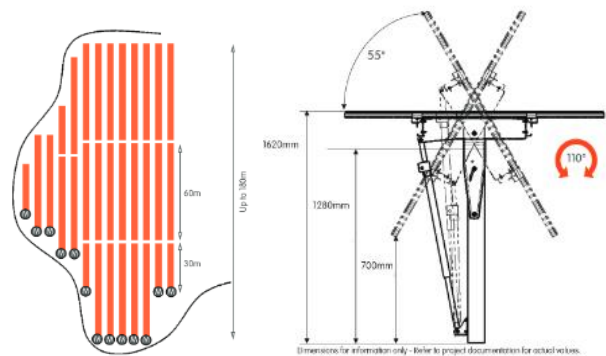
Exemple d'application en horticulture (Source : Hélène GARDERE)

4.1. Centrales solaires équipées de suiveurs

4.1.1. Tables solaires avec tracker à un axe

Les tables avec un dispositif de suivi du soleil sur un axe permettent d'orienter les panneaux de l'est à l'ouest (axe nord/sud) ou de les incliner de 0 à 90°. La première configuration est plus courante car elle permet une bonne occupation du sol, une production plus constante au long de la journée et un gain de productivité par rapport aux centrales fixes (10 à 20 %) tout en limitant le surcoût lié au dispositif de suivi et en proposant une meilleure durée de vie que les trackers deux axes. La seconde configuration semble moins répandue.

A l'instar des centrales fixes présentées précédemment, ces centrales peuvent abriter des élevages d'animaux (ex : volailles) et des fruitiers. Il existe toutefois le risque que les animaux dégradent ou prennent leurs poils dans les mécanismes des trackers. La mobilité des tables rend l'accès ou l'aménagement sous les panneaux plus complexe. La hauteur des structures doit donc être adaptée.



Trackers à un axe horizontal (Source : Exosun – Arcelor Mital)

4.1.2. Tables solaires avec un tracker à deux axes

Les dispositifs de suivi à deux axes sont équipés de tables photovoltaïques montées sur pylône ou sur plot béton avec un moteur permettant d'orienter les panneaux de façon optimale par rapport au rayonnement solaire, en fonction de la position du soleil dans le ciel, et donc de la saison et de l'horaire. Cette optimisation constante de l'azimut et de l'inclinaison permet des gains de productivité de 30 % à 50 % par rapport aux centrales classiques.



Trackers à deux axes SOLON et FEINA (Source : ENCIS Environnement)

La hauteur de ces modules ainsi que leur faible emprise au sol permettent un passage des engins agricoles normal et ainsi des pratiques culturales ordinaires, bien qu'une attention particulière doive être portée sur le mât ou le socle béton. De plus, l'ombre portée par les panneaux est suffisamment faible pour permettre aux rayons lumineux incidents d'irradier le sol et donc de ne réduire que très faiblement le rendement des cultures. Ce type de centrale permettrait donc une compatibilité avec plusieurs types d'agriculture, de l'élevage petit et gros bétail aux cultures.

Pourtant, de telles structures nécessitent des fondations bien plus résistantes que d'autres types de modules. C'est notamment un point d'ancrage cubique de 2 mètres de côté en béton armé qui est généralement conçu afin de garantir une stabilité nécessaire à la structure (Maurice 2020).

Les surcoûts en béton et en acier sont vraisemblablement à l'origine de leur faible développement en France, en plus de la limitation des 1 500 heures pleine puissance à l'époque des tarifs de rachats de l'électricité solaire fixés par décret.

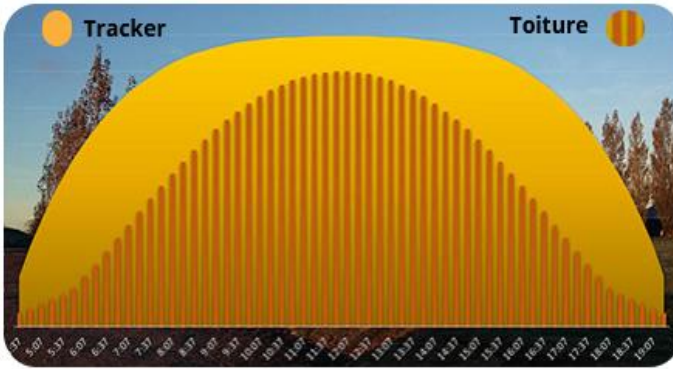


Schéma représentatif de la production électrique de panneaux solaires trackers par rapport à une installation fixe sur toit (Source : OKWind.fr)

Photo aérienne d'un parc au sol en Espagne équipé de trackers (source : Imbert)

4.2. Centrales solaires expérimentales pour l'agrivoltaïsme

D'autres technologies et d'autres types de structures sont créées en lien avec l'agrivoltaïsme : **les serres photovoltaïques avec modules translucides, les structures coulissantes, les structures élevées, les panneaux verticaux équipés de modules bifaciaux.**

4.2.1. Panneaux fixes en hauteur

L'installation de structures de grande hauteur a été réalisée pour des projets plus expérimentaux permettant ainsi une culture identique à une culture en plein champ. Elles sont suffisamment hautes pour permettre le passage des engins mécaniques. Il est fait l'hypothèse que ces structures hautes pourraient avoir un gain de productivité rendant plus acceptable leur surcoût si elles étaient équipées de panneaux bi-faciaux.



Système agrivoltaïque à Heggelbach près du lac de Constance en Allemagne (source Fraunhofer ISE)



4.2.2. *Panneaux mobiles en hauteur*

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

Les structures mobiles peuvent être de différents ordres :

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

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

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

La mise en place de ces structures permet **une utilisation des sols identique à des parcelles classiques** : elles sont suffisamment hautes pour permettre le passage des engins mécaniques. Les résultats agronomiques de ces technologies sont présentés au chapitre 5.2.2. Une attention particulière doit être portée à la structure, aussi bien lors du passage des engins que sur l'emploi de produits qui pourraient favoriser la corrosion.

Cette méthode favorise la production agricole en nécessitant un investissement conséquent au niveau de l'installation : les structures sont relativement hautes et se devant de résister aux intempéries (vents, grêle, ...). Par ailleurs, le pilotage des panneaux mobilise des technologies pointues (capteurs, pilotage à distance, ...).

Ces techniques restent encore expérimentales, le coût de l'installation reste difficile à évaluer.

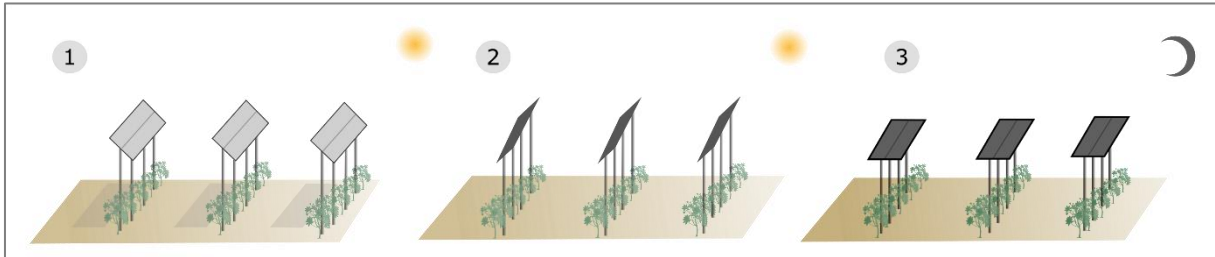
Nous prendrons trois exemples de technologies :

- Le programme de recherche **Sun'Agri porté par la société Sun'R** en partenariat avec l'INRA, l'IRSTEA et l'ADEME. Initiés dès 2009, des programmes ont permis d'étudier les performances d'installations fixes (Sun'Agri 2009-2012) et mobiles (Sun'Agri 2 2013-2017) sur des sites expérimentaux en plein champ. Le programme Sun'Agri 3 (2017-2022) vise à établir les bonnes pratiques de l'agrivoltaïsme en conditions réelles.

- La société **Ombrea** s'est également lancée dans la recherche sur la thématique. Cette start-up a été créée en 2016 par un horticulteur qui avait perdu une grosse part de sa production à la suite d'intempéries.
- La société italienne **REM Tec** a développé une technologie qu'ils ont nommé Agrovoltaico.

4.2.2.1 Sun'Agri et les trackers un axe en hauteur

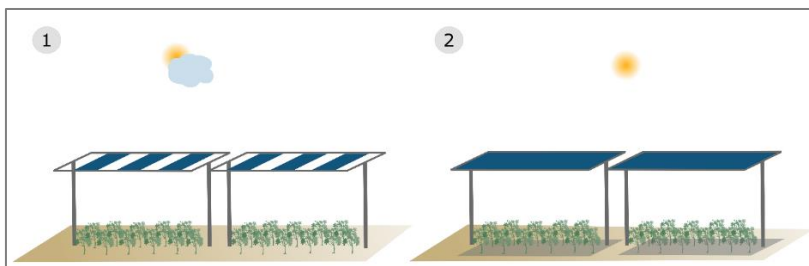
Avec le principe **Sun'Agri**, les panneaux sont orientés sur un axe nord-sud, leurs permettant de suivre la course du soleil. Les panneaux s'inclinent alors sur un axe, vers l'est le matin et vers l'ouest l'après-midi.



Principe Sun'Agri : l'inclinaison des panneaux varie pour protéger les plantes d'une forte insolation (situation 1), pour laisser les plantes profiter de l'insolation (situation 2) ou protéger les plantations du refroidissement nocturne ou les protéger d'une trop forte insolation (situation 3). (source : Ombrea)

4.2.2.2 Ombréa et les modules coulissants

Pour **Ombrea**, la technologie réside dans le fait de faire coulisser les panneaux dans des rails. Ils peuvent ainsi se superposer ou au contraire couvrir l'intégralité de la structure et occulter complètement le soleil.



Principe Ombréa : Panneaux coulissant selon les besoins des plantes : panneaux ouverts au maximum en cas de faible luminosité et/ou de besoin réduit (situation 1), panneaux intégralement déployés pour limiter l'insolation (Ombrea)



4.2.2.3 Trackers biaxiaux en hauteur REM tec

REM Tec a développé une technologie qu'ils ont nommé Agrovoltaico, projet breveté dans le monde entier. C'est un système de suivi solaire, simple ou biaxial, qui permet de capter un maximum de rayonnement solaire tout en n'étant pas dommageable pour le rendement agricole.

Les installations réalisées selon le brevet REM Tec ont une hauteur d'environ 5 m et permettent un faible impact de l'ombrage généré par la structure et par les modules photovoltaïques sur la croissance des cultures. La hauteur permet également un passage facile de toutes les machines agricoles (Edera.digital 2020).

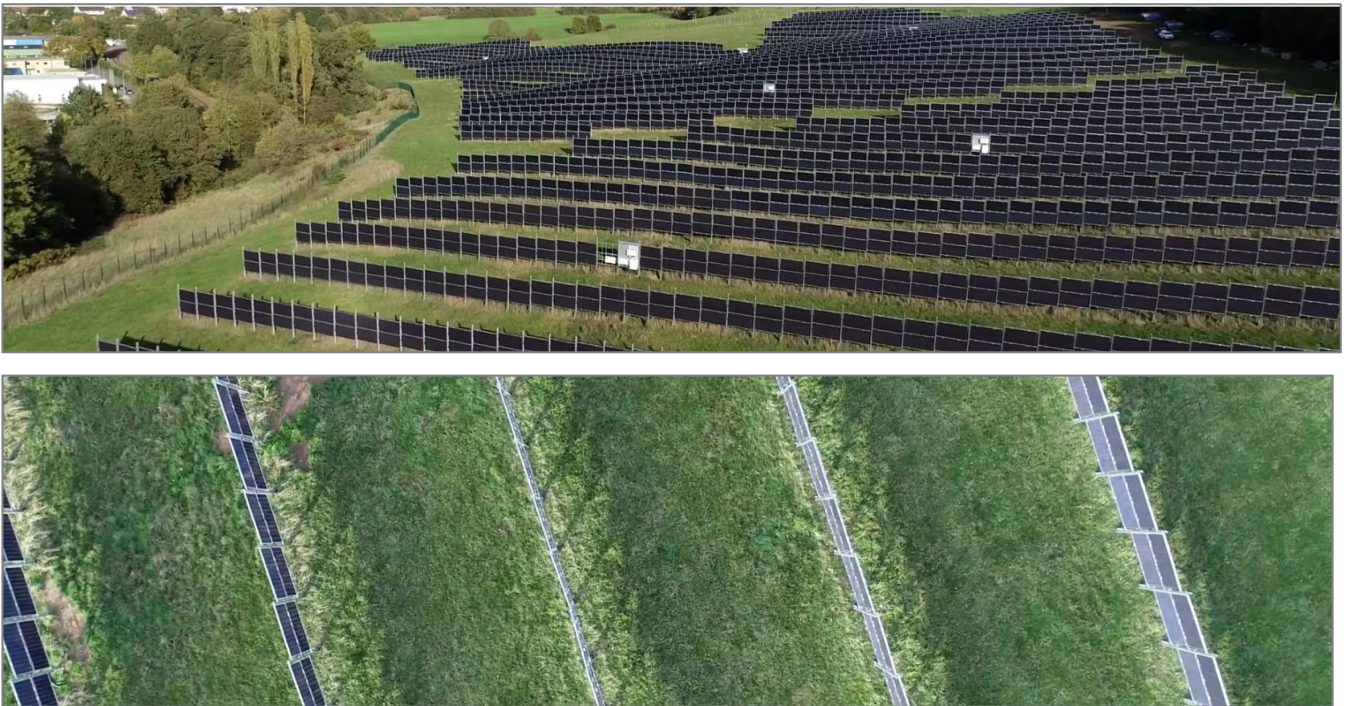
Principe REM Tec Agrovoltaico (source Rem Tec)



4.3. Panneaux fixes verticaux et bifaciaux

Pour pallier la consommation d'espace par des parcs photovoltaïques, la société allemande Next2Sun a mis au point des modules solaires double face. Ils sont installés à la verticale, avec une orientation est-ouest. Ils captent donc le soleil sur les deux faces en fonction des heures de la journée. Les modules sont conçus à l'aide de cellules bifaciales.

Cette technologie novatrice est très prometteuse pour le futur de l'agrivoltaïsme de part son espace important entre les rangées de panneaux photovoltaïques et de part son occupation du sol très réduite en comparaison avec d'autres systèmes. En effet d'après Next2Sun, les espaces entre rangées sont de 8 à 15 m sur les centrales déjà construites en Allemagne. De plus, la surface requise par le système photovoltaïque est inférieure à 10 % de la surface agricole. Cela permet un passage très simple des engins agricoles pour l'entretien des cultures. Le rayonnement solaire au sol est également favorisé sur une majorité de la journée étant donné qu'il n'est pas couvert. Ainsi il est possible de cultiver ou d'élever des animaux de manière quasi ordinaire.



Vues aériennes de la technologie bifaciale verticale (Next2Sun)

En France cette technologie n'est pas encore présente, pourtant de nombreux énergéticiens s'y intéressent. Notamment, la société Total Quadran a annoncé l'objectif de déployer 500 MW d'installations agrivoltaïques à l'horizon 2025⁷. De nombreux paramètres, tels que la topographie, la localisation géographique ou la technologie utilisée impactent la capacité de production d'un site. L'offre de Next2Sun permettrait d'installer une puissance de près de 300 à 500 kWc par ha. Soit une surface agricole concernée qui serait comprise entre 1 500 et 1 700 ha « avec une emprise au sol très limitée ».

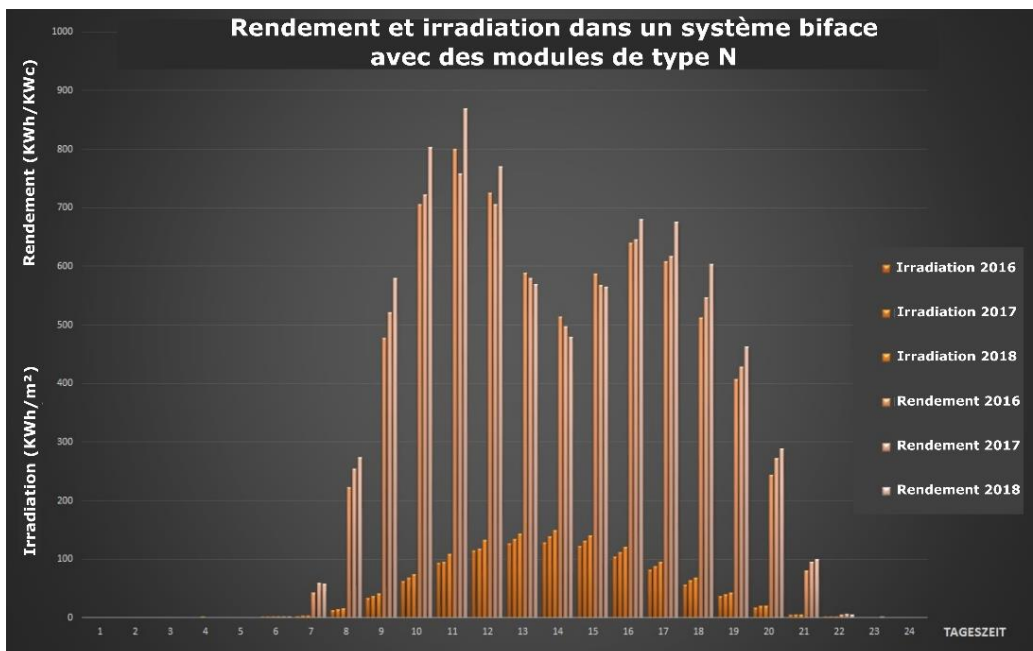
⁷ <https://www.actu-environnement.com/ae/news/agrivoltaisme-total-quadran-next2sun-panneaux-bifaciaux-35223.php4>

La disposition des panneaux permet une production électrique différente des installations classiques. Le profil de l'installation correspond à un profil de « chameau ». Les rendements les plus élevés se situent entre 10h et 12h et 16h à 18h, avec une période creuse en milieu de journée (cf. graphique suivant). Si un seul côté était actif le rendement ne serait que de 60 % par rapport aux modules traditionnels mais avec la bifacialité le rendement peut atteindre jusqu'à + 10 % en fonction du facteur de bifacialité et de la localisation du projet.

Autre avantage de cette disposition, la complémentarité de l'apport électrique sur le réseau avec les parcs classiques : l'énergie solaire peut être commercialisée à des périodes où les parcs orientés au sud produisent le moins (Kreutzmann 2017) et où le tarif de l'électricité est plus élevé.

Les panneaux verticaux sont beaucoup moins concernés par les dépôts de poussières que les panneaux inclinés, réduisant ainsi la fréquence d'entretien et de nettoyage.

Les **coûts d'investissement sont toutefois plus élevés** que pour des parcs classiques, du fait de l'utilisation de modules bifaciaux hautes performances et des structures moins courantes sur le marché. Une réduction de cet écart est cependant prévue en raison du fort développement des technologies bifaciales, et du changement d'échelle de production des structures verticales. Les coûts d'exploitation sont également légèrement plus élevés, en raison de la plus grande consommation d'espace malgré les économies liées à la faible emprise au sol.



Rendements et irradiation dans un système vertical biface à Merzig (Allemagne)

Des études comparatives de la productivité entre un parc à panneaux bifaciaux verticaux orientés Est/Ouest et des parcs avec des panneaux fixes inclinés et orientés vers le sud en France et en Allemagne ont montré des variations de production comprises entre -20 et +10 % en fonction de la latitude qui influe sur la course du soleil, ainsi que du coefficient de bifacialité des modules utilisés.

Le rayonnement solaire reste également bien disponible au sol pour les cultures une grande partie de la journée. Malgré des critères de topographie et de localisation géographique assez restrictifs, cette forme d'agrivoltaïsme a un fort potentiel étant donné que ces deux productions, électrique ou agricole, n'ont des

conséquences que minimales l'une sur l'autre. Ainsi ce n'est pas une synergie qui est créée dans ce modèle, mais bien deux productions parallèles qui n'influencent pas l'une sur l'autre : la production électrique peut atteindre son optimum car elle n'est pas biaisée par la culture, et cette culture n'est pas influencée par les modules de part leur faible emprise sur le sol.

Les espaces importants entre rangées nécessitent donc d'avoir des parcelles disponibles relativement grandes pour implanter suffisamment de panneaux et avoir une production suffisante pour assurer une rentabilité de la centrale, surtout si la technologie est encore coûteuse.

4.4. Serres photovoltaïques

Les productions électrique et agricole sont souvent associées aux serres photovoltaïques. Les serres photovoltaïques sont de grandes structures fermées et recouvertes de panneaux photovoltaïques. Leurs dimensions varient selon les besoins et l'emprise disponible.



Serre photovoltaïque en construction dans le Var (Source : ENCIS Environnement)

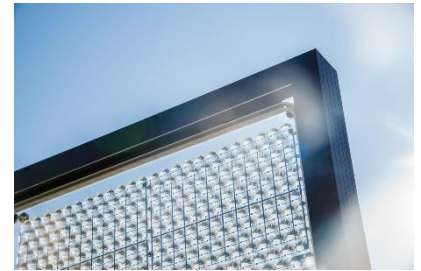


Illustrations de serres photovoltaïque et vue aérienne (source : Mathieu COLIN, Google Map)

4.5. Panneaux semi-transparents

Des modèles de modules sont semi-transparents, permettant ainsi de laisser passer suffisamment de rayons lumineux pour la bonne production d'arbustes fruitiers aimant particulièrement la mi-ombre.

Enfin, bien que le coût de ces modules ne soit pas encore bien défini, il est certain que ceux-ci seront bien plus onéreux que les simples bâches de protection. Pourtant il est possible d'imaginer une réelle rentabilité de l'installation avec une production fruitière plus durable et mieux sécurisée, évitant ainsi les années blanches, et cela en plus d'une production électrique non négligeable (Guesdon 2020). A l'avenir, il sera aussi possible d'installer des panneaux transparents (cf. panneau Insolight à droite).



Exemples de modules semi-transparents et d'application en plein champs (BAYWA RE)



5. Exemples d'orientations agrivoltaïques et retours d'expérience

Au regard de notre connaissance technique en photovoltaïque et en agriculture, la production de centrales photovoltaïques peut être compatible avec les activités agricoles, sylvicoles ou aquacoles suivantes :

- **élevage animal : ovin, volailles** (oies, poules, canards),
- **production de fourrage,**
- **horticulture :**
 - **culture maraîchère (légumes et fruits)**
 - **arboriculture (arbustes fruitiers)**
 - pépinière d'arbre
- **apiculture**
- **aquaculture** (ex : serres photovoltaïques sur bassins de spiruline, élevage de poissons, ostréiculture).

Dans cette approche générale, plusieurs pistes de multifonctionnalité ont été explorées (en gras dans la liste précédente). Grâce à la bibliographie et à des entretiens avec des exploitants agricoles et des exploitants de centrales photovoltaïques, nous dressons ici un inventaire et des préconisations sur des solutions agrivoltaïques déjà éprouvées.

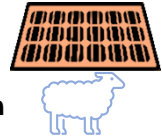
5.1. Les fermes solaires et l'élevage

Dans le but de combiner l'élevage d'animaux avec la production d'énergie d'un parc photovoltaïque, il est important de prendre en compte l'espèce souhaitée ainsi que ses particularités afin que l'entretien du parc se fasse correctement et que la production électrique ne soit pas amputée. Les pratiques agricoles doivent donc être anticipées avec l'exploitant dès la conception du projet. **De manière générale l'élevage devra être conduit de façon extensive**, c'est-à-dire, avec une faible densité de chargement d'effectif d'animaux pâturant en même temps sur la prairie. Ce chargement est calculé en fonction du nombre d'Unité Gros Bétail par hectare de surface fourragère totale (UGB/ha). **En France, pour qu'un élevage soit considéré comme extensif, il doit avoir un chargement toujours strictement inférieur à 0,6 UGB/ha** mais il sera variable en fonction des régions géographiques, les valeurs biologiques de la parcelle et de la qualité des sols (pour une bonne repousse de l'herbe notamment). Ainsi, d'après le retour reçu de différents acteurs de la filière, il est intéressant de prévoir, quel que soit l'élevage, des parcours ou subdivisions de la parcelle dans le but de réguler la pression de pâturage. Celle-ci doit être assez forte pour que les animaux consomment l'intégralité des plantes (et pas seulement les plus appétentes), mais assez faible pour permettre une bonne repousse des plantes, éviter un piétinement trop important et donc de maintenir les qualités agronomiques de la parcelle. Cette pression pastorale peut être adaptée par l'éleveur selon les conditions agro-climatiques de l'année ou de la saison (Poirier, Philippot 2012).

D'un autre côté, l'ombrage fourni par les panneaux peut être très bénéfique pour le bien-être animal et la production du bétail, particulièrement dans un contexte d'élevage en plein air avec des périodes de canicules de plus en plus récurrentes sur l'ensemble du territoire (Baron, Marcotte, Malterre 2020).

5.1.1. Elevage ovin

Souvent considérée comme une technique d'entretien des parcs photovoltaïques en exploitation, le pâturage ovin peut être combiné avec la production électrique et devenir une réelle pratique agricole. Pour en arriver là, il faut anticiper cette pratique lors de la conception du projet photovoltaïque et prévoir des étapes préparatoires aux travaux de mise en service des parcs photovoltaïques et un suivi.



Pour une circulation totalement libre des animaux ainsi qu'une pousse de la prairie peu impactée, il convient d'installer les modules à au moins 80 cm du sol. Un espacement d'au minimum trois mètres entre les rangs doit également être prévu afin de permettre le passage d'engin agricole notamment pour la fauche de l'herbe (et le semis de la prairie si celle-ci est artificielle).

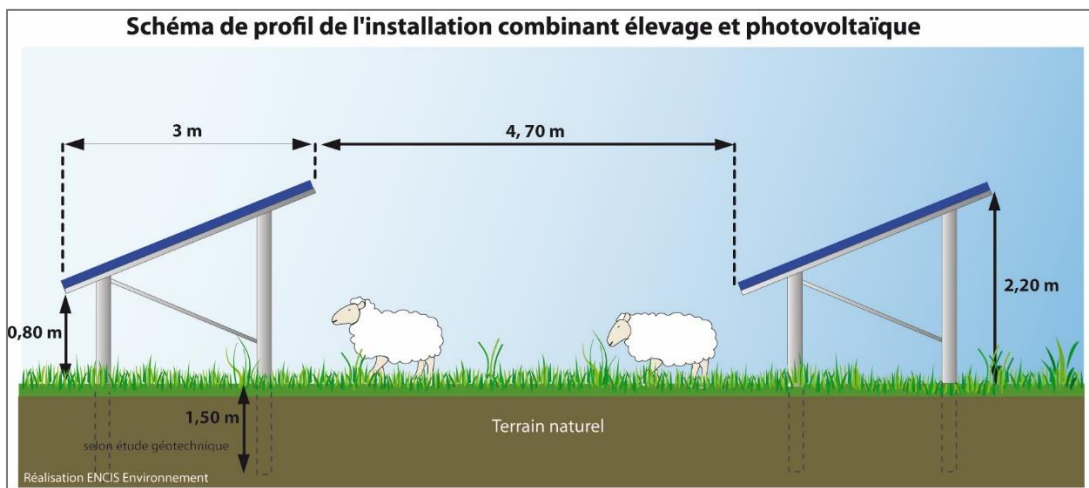


Schéma de profil de l'installation prévue combinant élevage et photovoltaïque (source : ENCIS Environnement)

Ces mesures minimales peuvent s'entendre avec des structures fixes, mais également des structures mobiles (trackers un axe ou deux axes) pour lesquelles la hauteur minimale corespondra à la hauteur lorsque les panneaux sont à leur inclinaison maximale.



Pacage ovin sur le parc solaire de Vinon-sur-Verdon - 83 (Source : Solaire direct)

Après le chantier, le semis d'un fourrage est un préalable recommandé pour garantir une alimentation de qualité et répondant aux besoins du troupeau. Le GNIS (Groupement National Interprofessionnel des Semences et plants) préconise d'optimiser la productivité des prairies en tenant compte des besoins des animaux selon leur stade physiologique de développement. La gamme d'espèces et de variétés pouvant être semées est très large, et doit également prendre en compte les caractéristiques du sol et du climat pour obtenir une bonne production. Selon les espèces végétales semées, un suivi agronomique de la parcelle doit être réalisé afin de vérifier la nécessité d'un réensemencement après 1 à 6 ans dans le cadre d'une prairie temporaire. Il se fera suite à un griffage du sol, sans travailler le sol en profondeur. Si, au contraire, la prairie est entretenue de manière permanente, le semis d'espèces manquantes (nutritives pour les animaux) peut être fait sous-couvert, c'est-à-dire directement dans la prairie.



Ovins pâturant sous les panneaux (Source : Jenson)

Le tableau ci-dessous donne un exemple non-exhaustif de prairie temporaire pouvant être semée pour la bonne alimentation d'un élevage ovin.

| | Janv. | Fev. | Mars | Arv. | Mai | Juin | Juil. | Aout | Sept. | Oct. | Nov. | Déc. |
|-------------------------------------|-------|------|--------------------|------|--------|--------|-------|------|---------------------|---------------|------|--------|
| Brebis à l'entretien | | | Ray-grass anglais | | | | | | RGA | | | |
| | | | Fétuque élevée | | | | | | | | | Fét. E |
| | | | Dactyle | | | | | | | | | |
| | | | Luzerne | | | | | | | | | |
| | | | Ray-grass d'Italie | | | | | | | | | |
| | | | Fétuque des prés | | | | | | | Fét. des prés | | |
| | | | | | | Brome | | | Trèfle incarnat | | | |
| | | | | | | Lotier | | | Trèfle d'Alexandrie | | | |
| Brebis suitées, agneaux en finition | | | Ray-grass anglais | | | | | | RGA | | | |
| | | | Trèfle blanc | | | | | | | | | |
| | | | Dactyle | | | | | | | | | |
| | | | Brome | | | | | | | | | |
| | | | Fétuque des Prés | | | | | | | | | |
| | | | | | Lotier | | | | | | | |

Aptitude des espèces fourragères à répondre aux besoins des brebis selon les époques de l'année (source : GNIS)

En plus du pâturage, il est nécessaire de prévoir un **entretien mécanique du site**. En effet, certaines plantes, moins apétentes pour le bétail, ne seront pas consommées et poursuivront leur croissance. Or, il est indispensable de conserver un couvert végétal qui ne dépasse pas la hauteur minimale des panneaux. Au moins une fauche par an restera nécessaire pour l'entretien (contre 6 ou 7 sans pâturage). Sans cela, certains éleveurs ont pu constater quelques retards de croissance dans leur cheptel. Les animaux vont être amenés à consommer l'intégralité de la végétation présente sur la parcelle et non pas seulement les plantes à fortes valeurs nutritives. Par ailleurs, les prairies ne doivent pas être fauchées avant le 15 juin, afin de laisser à un grand nombre de fleurs, d'invertébrés et d'oiseaux nichant au sol suffisamment de temps pour se reproduire. Le moment de la fauche est donc un compromis entre les exigences agronomiques et biologiques. Cette fauche pourra ensuite être valorisée en fourrage d'hiver sous différentes formes si les animaux sont rentrés en bâtiment durant la saison froide. Les professionnels en écopastoralisme ont notamment constaté que plus de 75 % de la production fourragère

annuelle poussait entre les mois d'avril et juin car, ces dernières années, les canicules estivales ne permettent pas une seconde repousse de la prairie.

Le rapport Quattrolibri préconise des chargements à l'hectare variables selon la nature des terres : entre 2 et 3 ovins par hectare sur les **Causses naturels**, et environ 6 brebis à l'hectare, en rotation sur des prairies naturelles en zones d'élevage traditionnel. En effet, afin d'assurer une bonne repousse de l'herbe et éviter un surpâturage, il est préconisé que le chargement du bétail en élevage extensif soit inférieur à 1 UGB / ha pour une prairie temporaire et 0,5 UGB / ha si la prairie est permanente et que donc les animaux sont toute l'année sur la parcelle. Ainsi, comme les ovins représentent environ 0,1 UGB, pour que l'élevage soit extensif et respecte les qualités de la prairie, il est possible de placer entre 5 et 6 brebis par hectare sur une parcelle (Quattrolibri 2009).

D'un autre côté il est important de créer et d'entretenir la prairie selon les conditions environnementales auxquelles l'éleveur va être soumis. Ainsi le choix des semences est primordial, mais également le choix des engins agricoles ou encore la prise en compte des prédateurs pouvant menacer le troupeau. Des aménagements tels que des points d'eau pour l'abreuvement et la mise en place de clôtures sont également des indispensables pour la mise en place de pâturage au sein d'un parc photovoltaïque (CIWF 2020).



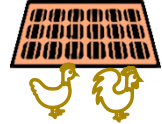
Brebis avec suiveurs en Allemagne (Solon AG) et moutons à l'ombre des panneaux (PV Magazine)

Retour d'expérience pratique : une chef de projet en agrivoltaïque et un conseiller en écopastoralisme interrogés recommandent cette technique notamment pour sa facilité de mise en place et sa viabilité économique. Elle peut avoir un réel avantage sur la gestion des plantes invasives telles que la renouée du Japon, l'ambrosie, les robiniers (etc.) si la pression pastorale ainsi que les espèces élevées sont bien choisies. Pourtant l'écopastoralisme ne remplace pas entièrement la fauche mécanique. Selon ces mêmes personnes, elle peut être réduite à 15 % par rapport à une gestion de parcelles fourragères sans animaux. Les éleveurs conseillent notamment de privilégier des espèces ovines plus rustiques, choisies car elles sont adaptées à consommer certaines variétés de plantes que d'autres refuseraient. Les races rustiques, moins sélectives sur leur alimentation, doivent donc être mises en avant. Les chambres d'agriculture admettent en général que le chargement à l'hectare va dépendre des conditions locales (conditions des sols et conditions climatiques). Par exemple en Charente, il a été prévu 4 à 7 brebis par ha.

Il est préconisé de protéger les câbles (qui descendent vers la boîte de jonction entre autres) des moutons qui peuvent parfois se frotter et en débrancher. Dans le cas d'un parc muni de modules trackers, il est important de prévoir avec l'éleveur au moins 2 tontes par an pour éviter que la laine ne se prenne dans les moteurs. Des véris hydrauliques sont ainsi privilégiés pour leur hauteur, réduisant ce risque.

Enfin le conseiller en écopastoralisme confirme que la gestion d'un tel élevage n'est pas forcément plus facile car l'approvisionnement en eau des abreuvoirs peut être plus laborieux. Il faut veiller également à ajuster la taille de la clôture avec le temps pour éviter que les brebis ne s'échappent ou qu'au contraire des prédateurs comme des chiens errants, des loups, des blaireaux, ou même des ours ne viennent s'en prendre au troupeau (particulièrement dans les régions à risque).

5.1.2. Elevage avicole



Le couplage de la production d'électricité et l'élevage avicole est également une possibilité. Actuellement, peu d'exemples existent pour des élevages avicoles, probablement en raison des superficies relatives de ce type d'élevage (quelques ares à quelques hectares) au regard de ce qui est généralement souhaitable pour réaliser des économies d'échelle sur un parc photovoltaïque (plusieurs dizaines d'hectares). **Les panneaux photovoltaïques dans les parcours de plein air peuvent avoir un intérêt comme abris pour protéger les animaux du soleil, du vent, de la pluie et même des prédateurs tels que les rapaces.**

Il est à noter que la **hauteur des tables doit être suffisante pour empêcher les animaux d'y monter** mais également pour éviter les dépôts de poussières soulevées par ces oiseaux, ce qui réduirait la production d'électricité. Ainsi des centrales sur pylônes avec trackers ou des structures fixes, surélevées comme des ombrières photovoltaïques à une hauteur de 2 mètres minimum, permettent la circulation libre et abritée des volailles et des éleveurs (QUÉRO 2017) (VALDEBOUZE 2017).

Les volailles étant des animaux granivores, **il n'est pas nécessaire d'ensemencer le sol d'une manière particulière**. La parcelle peut donc être entretenue de manière permanente, sans choix de variétés végétales semées.

Néanmoins, les volailles n'étant pas des animaux pâturent l'herbe, **un entretien de la parcelle est donc nécessaire par fauche ou tonte**. Un parcours est également à prévoir pour une circulation des animaux sur l'ensemble du parc et ainsi éviter que ces derniers ne stagnent à un seul endroit. Ainsi une préparation de l'état de la prairie est nécessaire avant de parquer les animaux. Il faut également **préparer différentes clôtures mobiles** dans l'enceinte du parc pour faciliter ce parquage.

Des aménagements tels que des **points d'eau pour l'abreuvement** et ainsi que la **disposition de nourriture en parcours** sont nécessaires. De plus la mise en place de **clôtures périphériques** est également indispensable pour ce type d'élevage au sein d'un parc photovoltaïque pour la sécurité des animaux et notamment pour empêcher la prédation.

Un essai sur une ancienne parcelle de culture d'ananas sur **l'île de la Réunion** est actuellement en cours. Après une vingtaine d'années de culture intensive, les sols se sont épuisés et une réflexion sur la reconversion des terres s'est posée. Ainsi, depuis 2016, **2 000 poules pondeuses vivent sous 1 ha de panneaux** photovoltaïques. Elles bénéficient de l'ombrage des panneaux, tout en produisant de la matière organique qui enrichit progressivement les sols. Cet élevage bénéficie de l'appellation « bio » pour la vente des œufs. Cette pratique s'inscrit comme une étape à la réhabilitation des terrains. Devrait s'ensuivre l'installation de plantes qui permettront de décompacter les sols et d'enrichir en azote, et à terme, le site devrait pouvoir servir à la culture maraîchère et de plantes aromatiques.

Autre exemple : un élevage de volailles sous **serres photovoltaïques** sur la commune de Torreilles. Cet exemple sur 20 ha de parc permet l'élevage de 14 000 poulets 100 % bio par an. Le double avantage de cette technique est de garantir l'ombre nécessaire au bien-être de la volaille et de la protéger des prédateurs, animaux ou maladies, sans devoir l'enfermer dans des bâtiments.



Élevage de poules pondeuses bio sur la centrale solaire FPV LES CEDRES, Etang Salé (Source : FPV JANAR – AKUO ENERGY) à gauche et élevage sous serres à Torreilles (Source : LaFranceAgricole) à droite

Selon les normes nationales, un élevage de poulets de chair sera labellisé « plein air » si le chargement en dehors des bâtiments est d'un animal pour 2 m² (soit 5 000 poulets/ha), et « **élevé en liberté** » s'il y a **4 m² de terrain extérieur disponibles par animal (soit 2 500 poulets/ha)**. (CIWF 2020)

Retour d'expérience : Les éleveurs de volailles consultés conseillent une hauteur minimale des panneaux à un mètre pour éviter que les animaux ne grimpent dessus. Ils prescrivent également une orientation de l'élevage vers de l'extensif, avec un chargement égal ou inférieur à 5 000 poulets/ha (norme « plein air »), avec un parcours très subdivisé. Certains conseillent, par exemple, un parcours de cinq sous-enclos par hectare à partir de 2500 animaux. Les volailles ont la capacité d'entretenir partiellement la végétation et peuvent même enrichir les qualités agronomiques du sol grâce à leurs déjections riches en azote.

Que ce soit pour un élevage de poules ou de canards, l'aménagement d'un parcours est nécessaire. Certains entretiens ont révélé que de petites surfaces de quelques ares recouvertes de modules pourraient être suffisantes. Dans ce cas, le chargement prescrit serait de 5 à 6 par m² par îlot de parcours afin de garantir un bon entretien.

La présence de panneaux pourra être profitable aux animaux d'une part car la clôture permet une protection des prédateurs terrestres et les modules eux-mêmes une protection contre les rapaces, la chaleur mais également contre les autres oiseaux possiblement porteurs de pathogènes (grippe aviaire).

Le cahier des charges de la PAC pour un label AB en volaille demande une part de 30% d'ombrage : celle-ci pourrait être fournie par les panneaux solaires.

Ce type d'agrivoltaïsme semble difficile à concrétiser dès lors que l'élevage est « trop petit ». On peut redouter notamment un manque de rentabilité si l'emprise du parc photovoltaïque n'est que de quelques hectares.

5.1.3. Autres types d'élevage ?

D'autres types d'élevage peuvent être aptes à être conduits sous des modules de panneaux photovoltaïques mais sont encore très peu pratiqués. En effet, **l'élevage de caprins par exemple obligerait une disposition des modules à une hauteur bien supérieure à cause de leur tendance à grimper**, sauf à étudier les chèvres naines. A moins d'envisager des clôtures électriques ou très solides autour des tables, l'élevage bovin nécessiterait une surélévation des modules, des fondations solides, ainsi qu'un chargement plus faible du nombre d'UGB/ha (en comparaison à un système d'élevage classique sans panneau solaire) dû à la taille et au poids de ces animaux. **Il est nettement plus difficile d'envisager une compatibilité entre un parc solaire au sol et l'élevage bovin.** Des tests existent néanmoins en France, menés par REDEN Solar avec la chambre d'agriculture départementale du Lot-et-Garonne.



Test d'élevage bovin sécurisé par des clôtures électriques en Lot et Garonne (Source : Reden Solar)

Enfin, **l'élevage de porcins, encore très peu élevés en plein air, ne semble pas non plus approprié** à une combinaison avec le parc photovoltaïque. Comme pour les bovins, ils peuvent endommager les structures par leur poids. De plus, les porcs élevés en plein air ont tendance à retourner la prairie et la détruire totalement en peu de temps. Cela s'avère donc incompatible avec la pose de panneaux photovoltaïques, notamment car leur rendement peut baisser rapidement à cause des dépôts de poussières sur leur surface. Ces animaux sont également connus pour ronger, ce qui peut être particulièrement problématique pour les câblages électriques et même dangereux pour les animaux.

Seuls des projets de trackers sur pylône sécurisés sembleraient adaptés pour ces animaux.



Unité solaire sur pylône avec tracker sécurisé par une barrière (Source : paysan breton)

5.2. Production Végétale

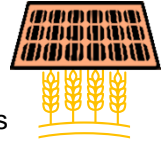
Le choix des différentes espèces végétales pouvant être produites sous des panneaux solaires est certainement plus important encore pour une production végétale que dans l'élevage. C'est dans ce cadre qu'il est primordial que l'agriculture soit la production principale et que le photovoltaïque n'en soit qu'une secondaire, adaptée aux besoins. Ainsi, pour préserver un rendement agronomique suffisant, le choix des espèces végétales mais également de l'installation solaire doit être compatible avec cette coproduction.

Il est par ailleurs possible de créer une véritable synergie de productions avec des échanges réciproques et dont les bénéfices peuvent être mutuels : « *En supposant des taux égaux d'énergie solaire entrante, une transition d'un écosystème végétal à une installation photovoltaïque solaire modifiera de manière significative la dynamique des flux d'énergie de la zone en raison de l'élimination de la végétation, et donc des flux de chaleur latente et d'évapotranspiration. Cela conduit à des flux de chaleur sensibles plus importants, qui donnent des températures localisées plus élevées. La réintroduction de la végétation, dans ce cas des plantes agricoles, rétablit les flux de chaleur latente et devrait réduire les pertes de chaleur sensible dans l'atmosphère.* » (Barron-Gafford et al. 2019).

La présence couplée de plantes et de panneaux PV produirait donc un microclimat plus stable et plus doux tout au long de l'année ce qui semble être favorable à une exploitation agricole de la terre (CLAESSENS 2020). Des résultats ont montré que la valeur de l'électricité produite par l'énergie solaire couplée à la production de cultures tolérantes à l'ombre a créé une augmentation de plus de 30 % de la valeur économique des exploitations agricoles déployant des systèmes agrivoltaïques par rapport à l'agriculture conventionnelle. L'utilisation de cultures tolérantes à l'ombre permet, en plus, de minimiser les pertes de rendement des cultures et donc de maintenir la stabilité du prix des récoltes (Dinesh, Pearce 2016).

Nous avons recensé les cas suivants de co-production : fourrage, maraichage, arboriculture, viticulture, pépinière, fleurs et bulbiculture.

5.2.1. Production de fourrages ou cultures



Les fourrages sont généralement constitués de plantes prairiales. Ils sont en majorité constitués d'espèces de poacées et dans un second temps de fabacées. Le but premier des fourrages est l'alimentation animale c'est pourquoi il est souvent préférable de sélectionner les plantes semées en fonction des besoins du bétail en protéines, fibres, azote etc...

La culture fourragère peut ainsi être exécutée sous panneaux photovoltaïques. Que ce soit avec des panneaux au sol, et par conséquent en inter-rang suffisamment larges, ou bien sous des panneaux surélevés, il suffit de prévoir une structure permettant le passage d'engins agricoles. Il faudra cependant veiller à une hauteur minimale des panneaux ne négligeant pas une pousse de l'herbe qui dépasse souvent 80 cm (particulièrement pour les grandes cultures fourragères tels que le maïs ou le colza fourrager). La production de fourrages et de cultures est également possible entre champs photovoltaïques montés sur pylônes équipés de trackers.

L'ombre octroyée par les panneaux permet de garder un sol frais et humide plus longtemps dans l'année et ainsi augmenter la possibilité d'une repousse végétale après la première fauche. Ainsi la production annuelle s'en verrait augmentée et répartie dans le temps, ce qui est bénéfique pour les productions de fourrages auto-consommés et pour sécuriser l'alimentation des animaux au local.



Parc photovoltaïque de Dirmingen (Source : Carolin Merkel et Next2Sun) et Exemple de panneaux « tournesol » en grande culture (Source : OKWind.fr)

La **nouvelle technologie des panneaux verticaux bifaciaux** pourrait s'avérer très favorable en termes d'optimisation de l'espace agricole si elle permet des projets techniquement et économiquement viables.

Un premier parc de 2 ha a été construit en 2018 à Eppelborn, en Sarre (Allemagne) et affichait une puissance de 2 MWc. Plusieurs autres parcs sont désormais en cours de construction.

L'espace inter-rang de 10 mètres en moyenne permet une utilisation agricole, avec la production possible de fourrage. La mise en pâturage est également possible. Des espaces importants entre les rangées permettent ainsi une utilisation agricole et mécanique plus poussée de la zone.

L'entretien de la parcelle d'un point de vue agricole nécessite donc des cultures plutôt basses et une tenue de la parcelle ne permettant pas aux plantes de faire de l'ombre aux modules. Cet entretien peut être fait mécaniquement car l'espace inter-rangs le permet, mais il peut également être fait par des animaux en pâturage sur la parcelle.



Dans le cadre d'une production de cultures sur les inter-rangs de ce type de système il faudra cependant surélever les panneaux plus haut que ce que propose la société allemande sur cette étude. En effet la majorité des cultures fourragères peut facilement dépasser 1 m de haut au moment de la récolte. Or dans ce cas, la perte de puissance électrique fournie dûe à l'ombre des végétaux portée sur les panneaux serait significative. Cependant une surélévation de ces panneaux verticaux pourrait augmenter les besoins en fondations pour la portance au vent, et par conséquent les coûts.

Toujours dans l'expérimental, le système en hauteur de suivi solaire, simple ou biaxial, Agrovoltaico REM Tec qui permet de ne pas dégrader le rendement agricole des cultures fourragères, de blé ou de maïs selon le fabricant. En plus de l'expérience acquise par l'entreprise REM Tec, des études ont été réalisées en partenariat avec l'Université de Piacenza et l'Institut Fraunhofer. *« Ces études nous ont permis d'avoir une connaissance parfaite de l'impact que l'ombrage générée par les modules génère sur la croissance des différents produits agricoles. Si, sur certaines espèces le système Agrovoltaico® n'a aucun impact sur le rendement agricole, sur d'autres il améliore notablement sa production. Les études réalisées ont montré une perte de rendement inférieur à 3 %, seulement dans le cas spécifique du blé et du maïs. »*



Culture d'orge et d'avoine sous des panneaux trackers bifaciaux (Source : remtec.energy)

Retour d'expérience : *les suivis écologiques des centrales PV nous signalent cependant un changement au niveau floristique entre les parties ombragées (sous les panneaux) et les parties recevant le soleil. En effet, il a été noté une croissance plus rapide d'espèces de graminées et une diminution des plantes à fleurs, ce qui peut être dommageable sur la diversité fourragère et donc sur la qualité finale de celui-ci. Des retours étayés sur la repousse végétale au droit des panneaux sont à venir dans un deuxième rapport de ce programme de RetD.*

5.2.2. Production maraichère : légumes et petits fruitiers

La culture maraichère est envisageable avec la totalité des techniques citées précédemment. Ainsi un espace de 3 mètres entre les rangs permet un passage des machines agricoles et un travail de l'exploitant facilité. De plus, là où la production de fourrages pouvait imputer la production électrique à cause de l'ombre créée par les cultures et projetée sur les modules, la production maraichère reste assez basse pour ne pas soulever ce problème.



Que ce soit en inter-rang ou bien sous les panneaux (en cas de surélévation de ceux-ci), n'importe quelle culture ne peut pas être produite. En effet il s'agit de porter une attention particulière à la perte significative de rayonnement solaire sur le sol. Une adaptation des pratiques culturales en conséquence mais surtout un choix de variétés réfléchi doit être mis en place (Marrou et al. 2012). La sélection variétale des cultures doit se porter sur des plantes ayant une efficacité maximale d'utilisation du rayonnement dans des conditions d'ombre fluctuante. **Les technologies doivent s'adapter au besoin des plantes, c'est pourquoi on trouve pour le maraîchage et la production des petites fruitiers arboricoles des technologies solaires très différentes : des centrales fixes basses, des structures hautes, des serres photovoltaïques ou des structures transparentes.**

5.2.2.1 Le maraîchage entre les rangs des centrales au sol fixes classiques

Sous des panneaux fixes, la production maraichère peut s'organiser en inter-rang. En fonction du type de culture prévu, il est nécessaire de prévoir des structures suffisamment hautes pour que les plantes ne créent pas d'ombre sur les panneaux photovoltaïques. Un écartement conséquent des structures permettra de conserver une zone suffisante pour la culture et permettre le passage d'engins agricoles nécessaires à l'exploitation.



Sur l'île de la Réunion, différents sites de productions maraichères ont été développés par AKUO :

- A Pierrefonds, la **production d'huile essentielle** de géranium rosat et de citronnelle se fait en inter-rangs,



Culture de citronnelle en inter-rang (Akuo)

A Pierrefonds, la centrale de 38 000 m² (dont 15 768 m² de panneaux) doit permettre la production simultanée d'environ 3 200 MWh d'électricité verte (soit la consommation annuelle de 800 foyers), de 80 kg d'huile essentielle de géranium rosat et de 100 kg d'huile essentielle de citronnelle⁸.

- tout comme la production de **pastèques, melons, piments**, etc. à Le Syndicat sur une ancienne friche agricole.



Culture de pastèques en inter-rang (source : Akuo)

5.2.2.2 Le maraichage sous les structures hautes expérimentales

En Allemagne, la Ferme solaire de Sigmaringen, au nord du lac de Constance a permis une expérimentation remarquable (Projet APV-Resola).

La « ferme solaire » comprend des panneaux montés sur des structures de 6 mètres de haut, ancrées dans le sol sans béton, avec une inclinaison fixe, optimisée par simulation pour permettre simultanément une production agricole et électrique. Le terrain consacré à l'expérimentation s'étend sur 2,5 ha dont l'installation photovoltaïque n'occupe que 0,5 ha. Quatre cultures ont été implantées : blé, trèfle, pomme de terre et céleri rave. Le but de ce projet est d'étudier la rentabilité du concept.



Système agrivoltaïque à Heggelbach près du lac de Constance en Allemagne (source Fraunhofer ISE)

⁸ <https://www.akuoenergy.com/fr/documents/getPdf/1479826327-5.pdf>

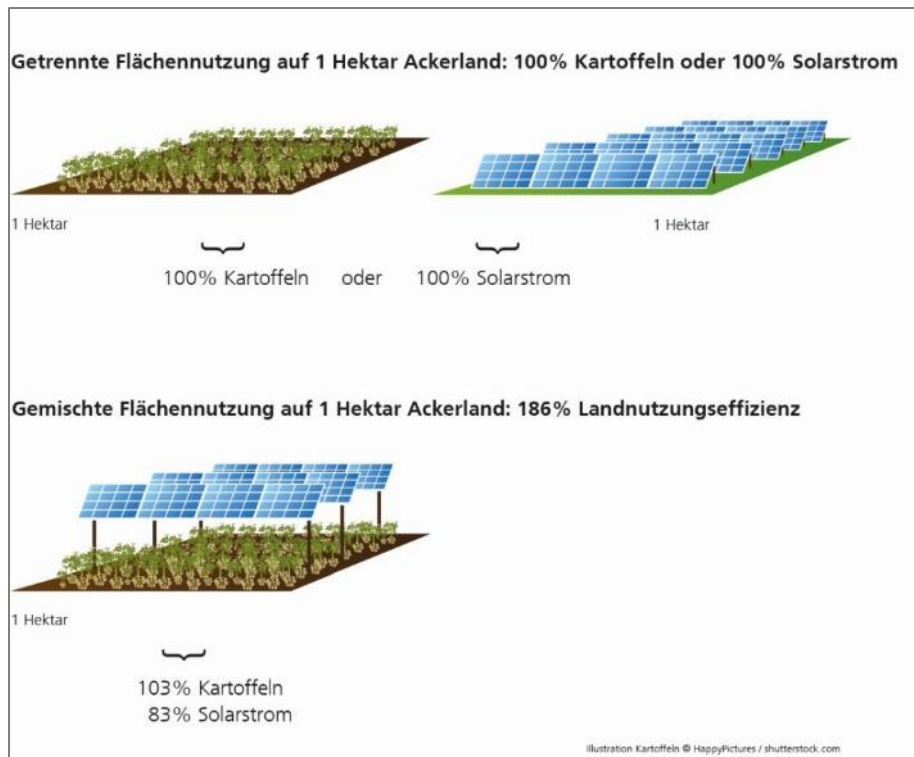
Après deux ans d'exploitation, le bilan de la ferme solaire de Sigmaringen s'avère positif sur différents points : Les rendements agricoles ont été supérieurs pour deux types de culture : + 12 % pour le céleri, + 3 % pour le blé d'hiver mais - 8 % pour le blé par rapport à la parcelle de référence.

Les conditions bioclimatiques ont été moins extrêmes : ensoleillement réduit de 30 % sous les modules, taux d'humidité sous les modules plus élevé en été et plus faible en hiver.

Avec un ensoleillement de 1 319,7 kWh/m², la production électrique de 2018 a atteint 250 MWh, soit un productible de 1 285,3 kWh/kWc installé, elle était de 1 266 kWh/kWc en 2017.

La production électrique a été autoconsommée à hauteur de 40 % au sein de la ferme, pour la recharge d'un véhicule électrique et le traitement/conditionnement des produits agricoles. Le reste a été injecté sur le réseau de l'énergéticien local. En été, la production électrique a pu couvrir quasiment 100 % des besoins de la ferme en journée, l'objectif étant d'augmenter la part d'autoconsommation grâce à un système de stockage.

« Sur la base du rendement de la pomme de terre en 2018, l'efficacité d'utilisation des terres est passée à 186 % par hectare avec le système agro photovoltaïque », explique Stephan Schindele de Fraunhofer ISE (Schindele 2019).



Efficacité des terres par rapport à la production de pommes de terre ©Fraunhofer ISE

La réelle rentabilité de ce parc reste toutefois difficile à évaluer, le projet ayant été financé par le ministère fédéral allemand de l'éducation et Recherche et FONA (Recherche pour le Développement Durable).

Les retours des expérimentations de structures en hauteur mobiles : Sun'Agri et Ombrea

En France, le site expérimental Sun'Agri a été construit en 2014 à Montpellier, sur le site de l'INRA. Deux thèses ont été menées : une première sur une modélisation du développement agronomique de la laitue, la seconde sur un modèle de bilan hydrique.

L'étude agronomique s'est basée sur la comparaison du développement de la laitue entre un mode de pilotage des panneaux suivant la course du soleil (mode favorisant par définition la production électrique au détriment de la culture) et un mode raisonné maximisant le rayonnement reçu par les plantes sauf autour du midi solaire où l'ombrage permet de limiter la demande évaporative.

Cette étude a montré que l'on pouvait améliorer à la fois les productivités électrique et agricole de la parcelle en utilisant des panneaux photovoltaïques dynamiques plutôt que stationnaires, tout en maintenant la production agricole à des niveaux proches de ceux obtenus en plein soleil. Comme attendu, le pilotage classique suivant la course du soleil, a largement augmenté la production électrique par rapport aux panneaux stationnaires mais il a également légèrement augmenté le rayonnement transmis aux plantes et ainsi la production de biomasse. Pour le mode de pilotage raisonné, le rayonnement transmis a fortement augmenté, et a favorisé la croissance de la plante mais au détriment de la production électrique (Sun'Agri 2020) (Pouliquen 2020).



Site expérimental dynamique (Source : Sun'Agri)



Système Ombrea et maraîchage (Source : Ombrea)

En parallèle, à son échelle, **Ombrea dresse un bilan positif de son dispositif sur différents sites expérimentaux :**

- Production de fruits augmentée par rapport à une parcelle témoin (50 % sur les fraises et 63 % pour les tomates),
- Consommation d'eau réduite de 43 % (pour des tomates),
- Protection efficace contre les brûlures (fruits et feuilles),
- Gelées de printemps évitées
- Réduction de 50 % du risque de montaison des salades en cas de forte chaleur.

Retour d'expérience des entretiens : Dans le cadre d'une activité maraîchère et d'une structure solaire fixe, il faut s'assurer de la compatibilité entre l'assolement et les conditions offertes par la présence de solaire. Il est nécessaire de concevoir un plan de rotation (sur plusieurs années, donc plusieurs types de cultures) composé de cultures "compatibles" avec le photovoltaïque.

5.2.2.3 Culture de petits fruitiers sous panneaux semi-transparents

La compagnie BayWa r.e. a développé une technologie solaire qualifiée de semi-transparente. C'est à la suite d'un projet pilote **au Pays-Bas** qu'une **structure avec ces panneaux transparents a été construite au-dessus de 3,2 ha de framboisiers**. La puissance des modules atteint maintenant **2,7 MWc** avec pas moins de 1 250 panneaux photovoltaïques. Cette technologie remplace les bâches qui étaient positionnées sur les cultures de fruits rouges mais sa structure, bien plus solide du fait qu'elle supporte des panneaux solaires, a pour but de résister plusieurs dizaines d'années, là où les bâches étaient changées annuellement et les arcs en aluminium tous les 6 ans. Cela limite aussi le travail d'assemblage et démontage des bâches plastiques.

La grande particularité de ces modules est bien sûr leur semi-transparence permettant de laisser passer suffisamment de rayons lumineux **pour la bonne production d'arbustes fruitiers aimant particulièrement la mi-ombre**. Bien sûr la présence de panneaux continue de protéger les cultures contre les intempéries et autres risques agro-climatiques tels que la grêle, les vents forts, le gel ou bien un échaudage des plantes durant les fortes chaleurs de l'été, avec un succès de protection plus efficace qu'avec des bâches en plastique.

Ces installations ayant été construites sous le même format que les protections anciennement utilisées sur ces mêmes productions de framboisiers, les techniques culturales et la façon dont sont cultivés ces fruits n'a pas évolué. Les installations permettent une bonne circulation des exploitants agricoles. D'après Groen Leven (le relais néerlandais de BayWa r.e), la production de cette culture sous panneau solaire donne un résultat entre 90 % et 100 % par rapport à la configuration traditionnelle.

« Cette solution pour les fruits rouges a beaucoup de potentiel. Grâce au projet pilote, nous voyons que le fruit sous les panneaux translucides se porte mieux jusqu'à présent. Ce fruit n'est pas encore au niveau du fruit selon la méthode conventionnelle de culture, mais je vois suffisamment de pistes et de potentiel pour développer davantage cette double fonction intéressante avec Groen Leven et Piet Albers. » (Klaas de Jager, The Greenery, grossiste en fruits et légumes)



Vue aérienne du projet pilote au sein l'exploitation fruitière de Piet Albers (Source : Google earth) – Installation en cours des modules Parc photovoltaïque sur l'exploitation fruitière de Piet Albers à Babberich (BayWa r.e.)



Parc photovoltaïque complet de 2.7 MWc sur l'exploitation fruitière de Piet Albers à Babberich – Organisation des plants sous les tables de modules (Source : BayWa r.e et Goenleven)

Il est également possible d'imaginer un développement vers d'autres productions de fruits rouges, présentant les mêmes caractéristiques culturales que la framboise, comme la fraise, la mûre ou la groseille.

Le projet « Solaire, ça pousse ! » dans le Gers (32) est par ailleurs en attente d'autorisation pour une installation de modules de ce type.

Retour d'expérience des entretiens : Une chef de projet en agrivoltaïque, spécialisée dans les cultures conseille la culture de petits fruits rouges comme les fraises, les groseilles, les framboises ou les mûres pour une bonne combinaison avec des panneaux solaires. En effet, leur faculté à apprécier la mi-ombre semble adéquat pour la pratique de l'agrivoltaïsme. Il faut cependant prendre en compte la nécessité d'un système d'irrigation localisé (type goutte à goutte) afin de permettre une bonne croissance des fruits.

La présence des panneaux permettrait une réduction du stress hydrique, une protection contre l'échaudage ou contre les intempéries, mais également la mise en place de systèmes de protection comme les filets protégeant de la grêle ou des oiseaux.

5.2.2.4 La culture sous serres photovoltaïques

Les productions électrique et agricole sont souvent associées aux serres photovoltaïques. Les serres photovoltaïques sont de grandes structures fermées et recouvertes de panneaux photovoltaïques. Leurs dimensions varient selon les besoins et l'emprise disponible.



Serre photovoltaïque en construction dans le Var (Source : ENCIS Environnement)

La préparation ainsi que l'entretien d'une serre photovoltaïque ne diffèrent pas d'une serre classique. La structure étant sensiblement la même que d'autres serres métalliques avec simplement l'ajout de panneaux photovoltaïques sur la toiture.

Après un développement important depuis les années 2008-2009, différents travaux et expérimentations réalisés par l'INRA et l'ADEME relativisent l'intérêt pour la production agricole de telles structures. En effet, le manque de transmission lumineuse des serres due à la couverture du versant sud par les panneaux (pouvant aller de 10 à 40 %) représente une baisse de rendement : - « 1 % de perte de luminosité = 1 % de perte de rendement, auquel s'ajoute le manque d'aération naturelle des serres.

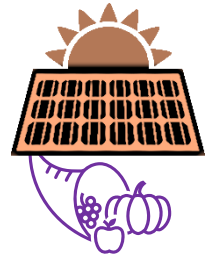
En 2010, l'ADEME préconisait donc de limiter les cultures sous serres PV aux cultures ayant des **besoins en lumière réduits**. De ce fait, la culture de tomates ou de concombres serait inenvisageable sous serres PV avec les techniques proposées actuellement (ADEME 2010).

En 2019, la DREAL Provence-Alpes-Côte-d'Azur a publié une plaquette d'information sur le cadre régional photovoltaïque. Elle y indiquait la complexité de l'utilisation des serres photovoltaïques et la nécessité d'adapter les serres aux réels besoins (superficie, système d'irrigation, système de ventilations, ...) et aux cultures envisagées, sans quoi, leurs performances agricoles étaient mitigées. Selon ce document, la culture sous serre PV, pour ce qui concerne les systèmes déjà mis en exploitation, aboutit pour l'instant à des rendements « moindres » par rapport à une serre classique (Petitpain, Drezet 2019).

Malgré une diminution de la luminosité sensiblement réduite, les serres photovoltaïques comportent les mêmes avantages qu'une serre agricole classique. En effet l'intérêt réside notamment dans la protection des cultures contre les intempéries ou bien les accidents climatiques tels que les vents forts, le gel ou la grêle. La serre photovoltaïque permet également une production désaisonnée de cultures maraichères, notamment en produisant des fruits ou légumes durant les périodes plus froides grâce à une température intérieure à l'installation supérieure à celle de l'extérieur.

5.2.3. Production viticole

Pour la viticulture, les structures privilégiées sont celles dont les modules sont en hauteur (au moins 4 m) pour laisser la possibilité d'un passage d'engins agricoles et la diffusion de la lumière. Cette combinaison est donc plutôt de l'ordre expérimental à l'heure actuelle.



L'installation de structures hautes permettrait que la culture se fasse de façon très ordinaire malgré une attention particulière portée aux installations lors des manœuvres d'engins. Par ailleurs, **la vigne est un secteur agricole qui subit très fortement les effets négatifs du changement climatique. Les panneaux solaires peuvent jouer le rôle de parasols géants pour les parcelles agricoles.** Ils sont aussi capables de **protéger la vigne des intempéries comme les vents forts, mais surtout contre le gel et la grêle** qui apparaissent généralement durant des stades sensibles pour la plante comme le débourrement ou la nouaison des grains. Avec les chaleurs extrêmes de l'été, parfois plus de 40°C, les vignes et autres arbres fruitiers subissent des brûlures pouvant abîmer les grappes. Ces fortes chaleurs jouent également un rôle néfaste dans la maturation du raisin qui se chargera plus en sucres avec un rayonnement plus intense et une chaleur plus forte. Or le taux de sucre est corrélé positivement avec le degré d'alcool du vin produit finalement. Il pourrait donc y avoir un intérêt agronomique notable dans la mise en place de structures photovoltaïques sur une parcelle de vigne, notamment pour la protection des plantes et pour la sécurisation d'un rendement. C'est d'autant plus vrai dans les régions souffrant de fortes canicules l'été car **l'ombre des panneaux permet également de conserver l'humidité des sols et ainsi d'économiser l'eau utilisée dans l'irrigation.**

Des expérimentations sur des parcelles de vigne sont actuellement menées dans les Pyrénées-Orientales (commune de Tresserre) et dans le Vaucluse (commune de Piolenc) par Sun'Agri.

Sur la **commune de Tresserre**, la parcelle concernée couvre une superficie de **4,5 hectares**, sur laquelle ont été plantés 17 310 plants de vignes, sous près de 8 000 panneaux photovoltaïques mobiles sur une structure à 4,2 m de haut avec un axe horizontal, soit **2,1 MWc** installé et un rendement surfacique de 500 kWc par hectare. Une parcelle témoin de 3 ha sans dispositif solaire permet de comparer les résultats obtenus (source : Sun Agri).

A **Piolenc**, le dispositif expérimental occupe 1 000 m², dont **600 m²** de surface et équipé et 340 m² de surface témoin, soit **84 kWc** installés.

L'écartement des poteaux des structures faisant jusqu'à 9 mètres, cela permet d'après les exploitants de maintenir la densité à l'hectare de plants de vignes conventionnels avec des inter-rangs de 2,25 m.



Parcelles vitivoltaïques (Source : Sun'Agri (à gauche et au centre) et Ombrea (à droite))

Cette technologie, inaugurée en 2018, doit faire l'objet d'un suivi sur 5 à 10 ans afin d'évaluer son intérêt pour la production de vin et sa qualité en comparaison avec des parcelles témoins. Les premiers retours indiquent toutefois une consommation en eau réduite de 12 à 34 % par rapport à la parcelle témoin⁹. Une augmentation de la température nocturne de 1 à 3 °C la nuit permet de préserver les jeunes plants de certaines gelées précoces. La première vendange a pu être réalisée plus tardivement que les précédentes années grâce à une maturation plus lente des raisins (l'arrêt de la croissance a été observé 6 à 13 jours plus tard sur les vignes sous protection par rapport au témoin non protégé), leur permettant d'être plus équilibrés en sucre. L'ombrage a également eu un effet positif sur le poids de baies, supérieur de 17 % dans les vignes protégées. La protection des plantes par les panneaux a permis d'éviter les brûlures sur les feuilles et les fruits. (Le Domaine de Nidolères [sans date]) Toujours d'après Sun'Agri, le profil aromatique est amélioré : +13 % d'anthocyanes (pigments rouges) et entre 9 % et 14 % d'acidité en plus à Piolenc. Pour une installation du même type que celle de Tresserre, il faut compter des coûts d'investissement de l'ordre de 500 000 € par hectare (Sun'Agri 2020) (Pouliquen 2020).



Vues aériennes du domaine de Nidolères (Source : Sun'Agri et Google Maps)

De son côté, **Ombrea** a équipé une première parcelle de vigne de 1 000 m² à Rians dans le Var en 2018. Suite à la première récolte, la société et le viticulteur annoncent des bienfaits : la concentration de sucre a été réduite de 5 %, une baisse d'un degré d'alcool a été constatée sur le vin, et les baies étaient 4 % plus lourdes que les témoins. Pratiquer les vendanges sous ombrière est aussi un atout d'après l'Institut Français de la Vigne et du Vin.



Passage d'engins mécanisés sous panneaux (Source : Ombrea)

⁹ <https://www.pv-magazine.fr/2020/03/31/premiers-resultats-de-lexperimentation-agrivoltaique-de-sunagri-a-piolenc/>

5.2.4. Arboriculture fruitière

Pour l'arboriculture, **les structures privilégiées sont, comme pour la vigne, celles dont les modules sont en hauteur** (au moins 4 m) pour laisser la possibilité d'un passage d'engin agricole, ou bien les modules verticaux. La culture se fera ensuite de façon très ordinaire malgré une attention particulière portée aux installations.



L'exploitation de différents arbustes fruitiers inférieurs à 4 mètres de hauteurs peut donc être envisagé : abricotiers, poiriers, kiwi, pommiers, etc. Les arbres de plein vent et de haute tige se développent à plus de 5 m et ne peuvent se combiner à une production photovoltaïque.

De même que la viticulture, **l'arboriculture est un secteur très sensible aux aléas climatiques tels que la grêle, les gelées tardives ou bien la canicule**. Ces événements impactant significativement les productions à travers leur rendement ou bien leur qualité. Ainsi la présence de modules solaires à une hauteur d'environ 4-5 mètres permettrait de combiner la production électrique avec la protection de ces cultures. Les structures photovoltaïques peuvent également servir de **supports à la mise en place de filets contre la grêle, les oiseaux ou les insectes**.

Les haies fruitières (ou murs fruitiers) nécessitent **un palissage qui est ainsi facilité par la présence des structures portantes** du système photovoltaïque.

De plus, dans le cas de trackers ou de modules coulissants (ex : Ombrea ou Sun Agri), la structure mobile pilotable à distance, permet de réguler correctement l'écoulement de l'eau sur la parcelle mais surtout l'intensité lumineuse délivrée au sol.

Des **essais sur des pommiers en Bouches-du-Rhône**, sur la station d'expérimentation arboricole de **la Pugères de 61 kWc sur 730 m²**, sont en cours par Sun'Agri. Couplés avec des filets anti-grêle, les panneaux photovoltaïques sont fixés sur des structures hautes, dont les poteaux servent de palissage aux arbres. Comme pour la viticulture, la protection des arbres évite les brûlures des fruits et permet une meilleure conservation de la fraîcheur sous les panneaux (- 2 à 4 °C) et de limiter le stress hydrique et les besoins en irrigation (- 63 % par rapport à la zone témoin) (Sun'Agri 2020).



Arboriculture sous panneaux photovoltaïques (Source : Sun Agri)

Un **verger d'abricotier a été planté en 2012** sur la commune de **Bellegarde** dans le Gard par AKUO Energy. Des ombrières photovoltaïques sont venues couvrir une superficie totale de 1,4 ha pour 5.9 MW installés

(Broussan et Château, respectivement 2 et 3,9 MW). Elles se composent de structures de 180 mètres de long et 13 m de large, 6 mètres de hauteur côté nord et 2 mètres de hauteur côté sud. Sous chaque ombrière, trois rangées d'abricotiers ont été plantées. Cette parcelle est conduite en agriculture biologique.

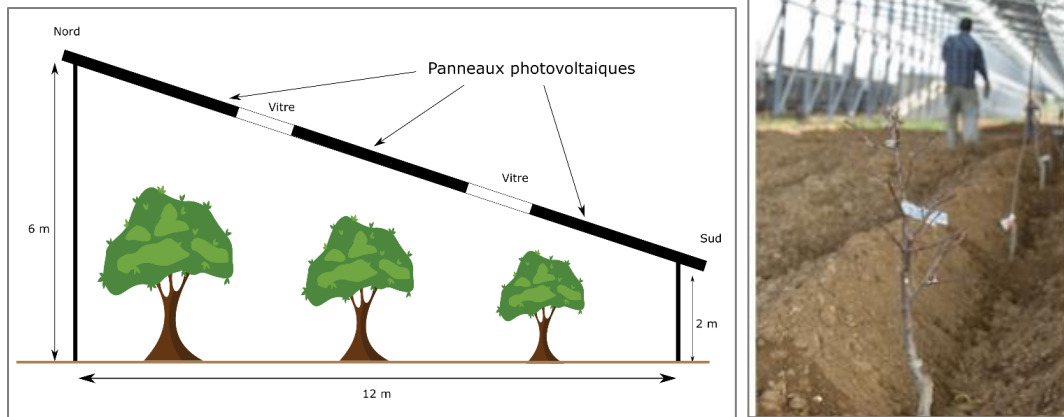


Schéma de principe de la structure photovoltaïque (source : bio-provence.org et Akuo energy)



Le réseau **Bio Provence-Alpes-Côte d'Azur a fait un bilan** des résultats. Après plusieurs années de préparation et d'optimisation, le verger a produit 8,5 tonnes de fruits par hectare en 2017, soit un rendement réduit de 30 %. Toutefois, l'avantage significatif de cette méthode réside dans la protection des cultures contre la grêle, la pluie et les fortes chaleurs ainsi qu'une meilleure protection phytosanitaire du verger contre le *Monilia laxa*. Cela se traduit par la réduction des traitements, la réduction des besoins en eau (divisés par 2) et un besoin réduit de désherbage sur les vergers adultes du fait du manque de lumière. Sur le long terme, cette méthode limite les années blanches de production nulle, permettant de sécuriser le revenu des agriculteurs.

Il est recommandé par les exploitants d'instaurer **un système d'irrigation** (goutte à goutte par exemple) particulièrement pour les rangées du centre qui ne peuvent pas profiter des précipitations contrairement aux rangées des extrémités pouvant capter plus facilement l'eau s'écoulant dans le sol (Bio-Provence, 2017). L'hétérogénéité de l'écoulement de l'eau est très importante dans ce type d'installation étant donné que l'ensemble des précipitations tombant sur les modules va s'écouler vers la partie sud. Cet écoulement localisé peut entraîner des dérèglements des qualités pédologiques du sol ainsi qu'une érosion par effet « splash » entre autres. Un système de rigoles récoltant ces écoulements doit donc être envisagé. Il permettra l'irrigation homogène de l'ensemble des cultures.

La production souffre légèrement d'un **manque de lumière**, se manifestant par un taux de sucre plus faible que les fruits « classiques » et craignent les coups de soleil après récolte puisque les fruits n'avaient jamais vu le soleil au cours de leur croissance.

Cette expérimentation souffre d'une **mécanisation rendue plus difficile du fait de la structure métallique**. Le passage des machines n'est pas garanti pour le côté où les panneaux sont les plus bas. **Aussi** les exploitants se doivent de **réduire les produits de traitement** utilisables à cause des risques de corrosion des éléments électroniques et des cellules photovoltaïques.

Les premiers retours d'expérience ouvrent des possibilités d'optimisation en fonction des caractéristiques et des besoins de différentes variétés d'arbres : les abricotiers en zone centrale, des cerisiers en partie nord où la hauteur disponible est plus élevée et de la vigne en partie sud, où la hauteur est réduite :

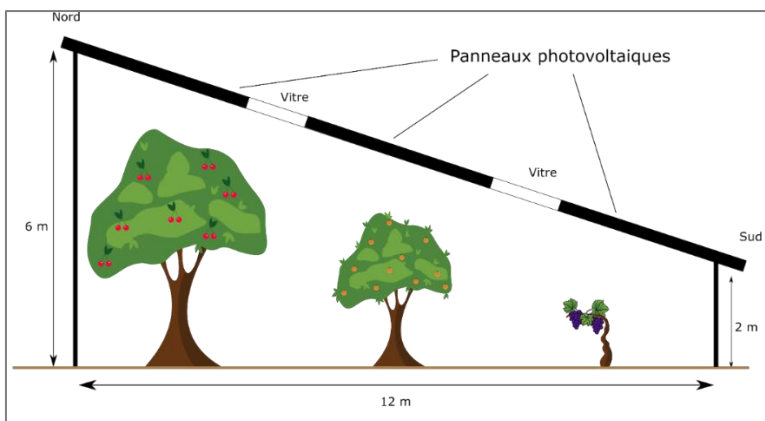


Schéma de principe de la structure avec différentes variétés (d'après : bio-provence.org) et photo aérienne de Broussans

Retour d'expérience : Que ce soit en combinaison avec des vignes ou avec des arbres fruitiers, l'intérêt des panneaux photovoltaïques dans ces combinaisons a été souligné par différents acteurs de la filière. Si le rayonnement résiduel est bien géré il permet une croissance presque normale des fruits tout en empêchant les brûlures par le soleil, ou les pertes à cause de la grêle ou d'autres accidents climatiques.

Il est particulièrement important de veiller à ce que les arbres et les fruits puissent avoir accès à une quantité de lumière suffisante durant les périodes de croissance et de maturité des fruits. Un manque de lumière impactera directement le taux de sucre contenu dans les fruits et, par conséquent, leurs qualités organoleptiques à la récolte.



5.3. Apiculture



Il est possible de **combiner parc photovoltaïque, culture maraichère ou fruitière, avec de l'apiculture et de bénéficier d'une triple synergie** entre ces trois productions. L'apiculture est une activité complémentaire de la production photovoltaïque et de la production agricole pouvant être mise en place sur un parc photovoltaïque, soit en rendant le parc favorable aux plantes mellifères, soit en misant sur le réseau de haies périphériques. Dans tous les cas, il conviendra de veiller à une sélection d'essences différentes, avec des périodes de floraison décalées dans le temps.

D'un point de vue pratique, les préconisations à prendre en compte dans l'implantation des panneaux solaires sur des sites destinés à accueillir des jachères apicoles sont limitées : **la création de points d'eau répartis sur les sites** (une colonie d'abeilles absorbe de l'ordre de 120 litres d'eau par mois), ainsi qu'un **espacement entre les tables de panneaux** identique à celui proposé pour l'élevage ovin, afin de permettre le passage d'un petit engin pour **réaliser les semis**. (Quattrolibri 2009)

La composition du mélange dépend d'un certain nombre de paramètres, et en particulier les caractéristiques locales et des autres activités potentiellement présentes sur le site. Le Réseau Biodiversité pour les Abeilles a mené plusieurs études ayant permis de labelliser un certain nombre de mélanges, soit destinés à des intercultures, soit à des jachères. Les espèces suivantes sont par exemple couramment utilisées : Achillée millefeuille, Anthémis des teinturiers, Souci, Bleuet des champs, Centaurée jacée, Gaillet jaune, Porcelle enracinée, Marguerite, Lin vivace, Lotier corniculé, Coquelicot, Plantain lancéolé, Sauge des prés, Petite pimprenelle, Silène penché, Solène enflé, Trèfle rouge, Agrostide capillaire, Flouve odorante, ...

La conservation d'un couvert végétal intéressant présent avant les travaux d'aménagement du parc photovoltaïque est également une solution possible. Certains sites tels que d'anciennes landes abandonnées et laissées sans entretien peuvent être valorisées : la coupe du couvert arboré permettra d'améliorer la luminosité globale du site. Les bruyères (Callune et Bruyère cendrée par exemple), plantes hautement mellifères, pourront se régénérer et favoriser la présence des abeilles. Des plantations en inter-rang sont envisageables. (RBA 2020)



Jachère fleurie (Source : RBA)

Des études mettent en cause une **possible influence des ondes électromagnétiques sur le comportement des abeilles (STEVER, 2005)**. Celles-ci pourraient entrer en résonance avec une partie du cerveau de l'insecte et entraîner des défaillances de communication ou une désorientation, perdant le chemin vers la ruche il meurt laissant petit à petit cette dernière à l'abandon. Sur une installation photovoltaïque, c'est l'onduleur qui produit le plus d'ondes électromagnétiques car il transforme le courant continu en alternatif. Cependant l'intensité de ces ondes décroît extrêmement rapidement avec la distance (proportionnellement au carré de la distance). **Ainsi, à 1 m des panneaux et 2 m de l'onduleur, le champ électromagnétique émis par les modules est égal à celui émis naturellement par la Terre. Il faut donc veiller à respecter ces distances** (Décrypter l'énergie 2020).

Il est important, dans le cadre d'une combinaison avec l'apiculture, d'étudier au préalable l'environnement à proximité du parc. En effet, les abeilles, comme tous les insectes, sont très sensibles aux produits chimiques. Ainsi, la proximité des ruches avec un champ ou un verger conduit de manière conventionnel (c'est-à-dire avec l'apport d'intrant chimique et notamment d'insecticide) pourrait entraîner une forte mortalité dans l'essaim. Le rayon de butinage des abeilles est d'environ 3 km autour de la ruche. Dans ce rayon il faut donc veiller à avoir les ressources nécessaires en pollen tout au long de l'année, des points d'eau, et éviter la présence de cultures conduites avec des protections chimiques telles que des insecticides.

La présence d'un rucher permet une très bonne pollinisation de toute la végétation alentour. Cela peut donc encourager le développement floristique sauvage mais également celui des prairies temporaires ou permanentes. Ainsi, la présence de colonies d'abeilles sous les panneaux solaires peut être ajoutée à une gestion pastorale (d'ovins par exemple). Les abeilles garantiront donc la bonne floraison de la végétation importante pour l'alimentation du bétail, les animaux permettront quant à eux un bon entretien de la parcelle.

Le nombre de ruches à l'hectare est calculé en fonction du potentiel de butinage (déterminé par la densité de plantes mellifères dans un rayon de 3 km des ruches).

Il est également possible de combiner cette même apiculture dans un parc photovoltaïque, avec une production maraîchère ou arboricole (conduite sans insecticide). La présence d'abeilles dans un verger permet ainsi une meilleure pollinisation des arbres fruitiers et donc possiblement augmenter le rendement final de ce verger (ou de toute autre culture). De plus, si la pollinisation est bien contrôlée, le miel produit peut être vendu comme étant un miel monofloral, c'est-à-dire produit à partir du nectar d'une seule espèce végétale (à 80 % minimum). Par exemple il est possible de produire de miel dit de tournesol ou de colza en plaçant les ruches dans ces mêmes champs en période de floraison.



Illustration de l'apiculture devant des tables de module - Travis and Chiara Bolton au Minnesota, USA (Smithsonian Magazine)



Mesures concrètes conseillées pour un semis d'espèces herbacées mellifères :

Objectifs :

- Favoriser la reprise d'une végétation herbacée suite aux travaux pour limiter le phénomène d'érosion des sols,
- Favoriser l'intégration paysagère du parc,
- Restaurer un couvert végétal adapté au contexte local,
- Maintenir et préserver une activité apicole sur l'aire d'étude immédiate. La qualité mellifère du secteur sera restaurée voire renforcée.

Description de la mesure :

Disposition : Sur un espace inter-rang de tables sur deux. Hors zones de plantations d'arbustes.

Espèces :

- *Achillea millefolium* (Vivace),
- *Anthriscus sylvestris* (Bis annuelle),
- *Avenella flexuosa* (Vivace),
- *Dipsacus fullonum* (Bisannuelle),
- *Digitalis purpurea* (annuelle),
- *Hypericum perforatum* (Vivace),
- *Leucanthemum vulgare* (Annuelle),
- *Rumex acetosa* (Vivace).

Les semis utilisés devront se rapprocher de souches sauvages (favoriser le label « végétal local » ou « Vraies messicoles »).

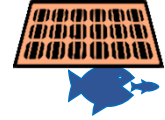
Programme d'entretien de la prairie : Fauche annuelle en juillet et en octobre

Calendrier : printemps de l'année après travaux



Jachère mellifère – Minesota USA (Smithsonian Magazine)

5.4. Aquaculture



Plusieurs sous-productions aquacoles peuvent être mises en œuvre sous des panneaux photovoltaïques : piscicultures, élevage de crustacés, ostréiculture, culture d'algues (ex : spiruline), etc.

5.4.1. Pisciculture

Sur des piscicultures en bassin, des structures fixes sont privilégiées :

A la Réunion, une **ferme aquacole** a été équipée de panneaux photovoltaïques : 12 bassins ont été recouverts d'ombrières photovoltaïques, pour une puissance de 12 MW. Le chef de projet y voit des atouts pour l'exploitation aquacole :

- Limiter l'évaporation d'eau
- Favoriser une régulation thermique de l'eau
- Protéger de la prédation des oiseaux



Ferme aquacole à Etang Salé (Source : Akuo Energy)

Sur la commune de Neuvic, en Dordogne, le projet consiste à implanter une couverture photovoltaïque sur 26 000 m² de **bassins d'élevage d'esturgeons** destinés à la production de caviar. Ainsi, une puissance de 4,9 MW sera installée.

L'exploitant met en avant les arguments positifs suivants :

- Moindre réchauffement de l'eau en été (températures dépassant 26°C l'été),
- Confort pour les poissons (qui craignent la lumière),
- Disparition des algues dans les bassins (meilleure maîtrise de l'oxygène la nuit),
- Travail au sec toute l'année de l'exploitant,
- Convoyage aisé des câbles et tuyaux pour l'électricité, les alarmes, l'oxygène via la structure de la couverture.



Projet de couverture de bassins à Neuvic (Source : REDEN Solar - Enerfip)

5.4.2. Production d'écrevisses

Dans la province du Jiangsu en Chine, 100 000 panneaux fixés sur des structures métalliques recouvrent 800 000 m² de bassins et permettent la **production d'écrevisses**.



Élevage d'écrevisses sous panneaux solaires dans le Jiangsu, dans l'est de la Chine (Source : Xinhua Video)

L'entretien des bassins sous panneaux photovoltaïques se fait de manière ordinaire. L'eau doit pouvoir circuler de façon à maintenir un taux d'oxygénation idéal pour la vie des poissons. Les pertes en eau, et donc le remplissage des bassins étant diminués par une baisse significative de l'évaporation grâce à l'ombre apportée par les panneaux.

Afin de garantir la bonne aération des bassins et ainsi la bonne oxygénation de l'eau pour les poissons, il convient que la structure soit ouverte au maximum à sa base.

Ce type d'installation permet de considérablement réduire le taux de mortalité des poissons ou autres animaux aquatiques tout en produisant de l'énergie. Les modules permettent en effet d'assurer un ombrage permanent sur les bassins ce qui en réduit la température et donc limite l'évaporation. Cela permet de mieux contrôler le cycle de l'eau donc d'en réduire les pertes, mais également de maintenir une bonne oxygénation nécessaire à la croissance des animaux. Les panneaux assurent également le rôle de protection contre la



prédation par les oiseaux. Autre intérêt : les employés bénéficient de l'ombre apportée par les panneaux, surtout lors des fortes chaleurs (AkuoEnergy 2014).

L'aménagement de la ferme aquacole à Etang Salé a permis d'augmenter la production de poisson (Tilapia) de 30 % sur la ferme, grâce à une réduction du taux de mortalité des poissons.

Le parc photovoltaïque de « Neuvic » est composé de 11 000 modules de 315 Wc de puissance unitaire. Le montant total de l'installation s'élève à 5 663 000 €. Avec une production attendue de 5541 MWh par an, le chiffre d'affaires prévisionnel annuel est estimé à 459 903 €.

L'installation chinoise permet l'alimentation en électricité de près de 20 000 familles, tout en répondant à la demande croissante pour l'alimentation.

5.4.3. Ostréiculture

Autre expérimentation à l'étude : l'ostréinerie¹⁰. Ce projet, né sur le bassin de Thau, consiste à fixer des ombrières munies de panneaux photovoltaïques sur les tables d'élevage déjà présentes dans le parc à huîtres. L'objectif recherché est de protéger la production d'huîtres en favorisant l'ombrage de l'eau et de limiter la prolifération d'algues en périodes estivales (la malaïgue) qui a pour effet de diminuer le taux d'oxygène dans l'eau. En 2018, la température du bassin avait atteint 29°C en été, ce qui avait eu pour conséquence une prolifération d'algues et la perte d'un tiers de la production annuelle. Ce projet, dont un premier test devrait être expérimenté courant 2020 sur une vingtaine de tables, pourrait à terme être étendu à l'intégralité du bassin, soit 300 ha. Il pourra se coupler avec un système de « marée solaire » qui consiste à exonder les huîtres comme dans les zones d'élevage en Atlantique afin d'améliorer la qualité de la production.

6. Quelles perceptions sociales pour les projets agrivoltaïques ?

Comme tout projet d'énergie renouvelable se développant sur les territoires, l'agrivoltaïque se confronte au regard des habitants et des usagers du territoire, dont les agriculteurs. La réussite de ces projets tient en grande partie à la prise en compte de ces perceptions et représentations sociales lors de leur élaboration.

L'acceptabilité sociale peut être étendue à plusieurs domaines recouvrant notamment celui de l'aménagement du territoire. Arnaud Lecourt, Maître de conférences en droit privé et directeur de l'institut d'études judiciaires de Pau et Guillaume Faburel, Professeur d'études urbaines à l'Université de Lyon (2011) donnent la définition suivante : c'est « le consentement d'un groupe social à recevoir à proximité de son lieu de vie un aménagement ».

Le solaire photovoltaïque bénéficie plutôt d'une bonne image auprès de la population française. Cette énergie est globalement soutenue par les français (89 %) qui accepteraient une installation solaire (chiffre globalement stable depuis 2014, baromètre les Français et l'environnement, enquête ADEME annuelle 2019, vague 6) à proximité de chez eux. En revanche, les Français posent des conditions de taille et d'implantation : seuls 26 % cette année accepteraient une installation au sol de grande taille (-3 points depuis 2018). La majorité

¹⁰ <https://sw-ke.facebook.com/AkuoCoop/posts/2443553122630363/>



des Français réfractaires à ce type d'installations pourrait changer d'avis si une contrepartie financière individuelle ou collective était négociée (51 %). Ils seraient alors 63 % à accepter des installations solaires de grandes tailles.

Toute catégorie sociale confondue et sur la question de l'acceptation d'une centrale photovoltaïque de toute taille, **ce n'est pas le critère esthétique qui arrive en premier**. C'est en premier lieu la **priorité à d'autres usages des sols** et des surfaces de bâtiments (agriculture, loisirs, végétalisation) **qui est donnée pour 64 % des répondants**. La question de l'esthétique et du paysage se retrouve chez 36 % des sondés. S'il ne s'agit pas de l'objectif prioritaire dans la bonne réalisation d'un projet agrivoltaïque, un travail sur cette thématique permettrait néanmoins de faciliter l'acceptation sociale de ce type d'aménagement. Il existe effectivement le risque d'une banalisation des paysages par l'introduction de nombreux systèmes photovoltaïques de grandes ampleurs sur les paysages de prairies et de culture.

Une enquête IFOP de janvier 2020 tend à montrer que pour l'opinion public, les zones agricoles ne semblent pas les plus appropriées selon les interviewés pour l'installation de parcs photovoltaïques (les friches industrielles ou militaires et les anciennes carrières étant les plus souvent citées). Cela représente bien la situation vécue sur le terrain. Des oppositions vives se font ressentir contre cette crainte de voir accaparées les terres agricoles par les producteurs d'énergie solaire. Toutefois, bien que méconnue pour 77 % des sondés, la notion d'agrivoltaïsme, une fois sa définition connue (*« l'agrivoltaïsme consiste à placer des panneaux solaires au-dessus de cultures ou d'élevages en plein air, afin de produire de l'électricité et, parallèlement, de protéger les cultures ou les animaux de certaines conditions climatiques. La lumière doit donc être partagée entre ces deux types de production »*), semble plutôt prometteuse dans la mesure où **80 % des personnes interrogées se déclarent favorables à ce que des projets agrivoltaïques** se développent sur leur commune.

Dans le cadre d'une installation agrivoltaïque, la forme de l'aménagement est fortement conditionnée par les exigences de productivité tant sur le plan agronomique que sur le rendement énergétique des panneaux. Cette forme est aussi conditionnée par le choix du site, la filière agricole existante, les solutions techniques mises en œuvre et dépend de la topographie du site et de ses environs proches. A la différence de la centrale photovoltaïque au sol conventionnelle, un parc agrivoltaïque pourra avoir une emprise verticale plus importante, montant jusqu'à 4 ou 5 mètres du sol. Il sera donc potentiellement plus visible qu'une centrale photovoltaïque au sol. Dans ce cas-là, des mesures de mise en place de haies autour de la centrale, visant à mieux l'intégrer, seront potentiellement moins pertinentes.

Le projet paysager d'un complexe agrivoltaïque est assez similaire à celui d'une centrale photovoltaïque au sol plus classique. Cela peut être perçu à la fois comme une contrainte : la forme de la centrale devra obéir à des nécessités de rendements agricoles, ou un atout : **agricole et photovoltaïque fonctionnent selon un mode symbiotique permettant une optimisation des rendements**.

Du point de vue de l'acceptation sociale, cette notion symbiotique semble intéressante car permettant de mettre en avant une **optimisation des usages sur un même lieu** tandis que le développement d'une centrale photovoltaïque seule peut faire craindre une montée des conflits d'usage, car elle ne prend pas toujours en compte l'usage des sols existants.



BIBLIOGRAPHIE

- ADEME, 2010. *Serres agricoles photovoltaïques* [en ligne]. ADEME. [Consulté le 4 mai 2020]. Les avis de l'ADEME. Disponible à l'adresse : <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/avis-ademe-sur-serres-agricoles-photovoltaïques-2010.pdf>
- ADEME, 2018. *Agriculture et énergies renouvelables : contributions et opportunités pour les exploitations agricoles* [en ligne]. Février 2018. [Consulté le 30 avril 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/201806agriculture-enr-contributions-opportunités-2018-rapport_final.pdf
- ADEME, 2019. *ÉVALUATION DU GISEMENT RELATIF AUX ZONES DELAISSEES ET ARTIFICIALISEES PROPICES A L'IMPLANTATION DE CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES*. Disponible à l'adresse : <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/rapport-etude-potentiel-pv-friches-parkings-2018.pdf>
- ADEME/ OpinionWay. 2018/11. « Les français et l'environnement—Vague 6 ». 48 pages
- AGRESTE, 2020. *Statistiques Agricoles* [en ligne]. 2020. [Consulté le 20 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <http://agreste.agriculture.gouv.fr>
- AGRESTE, 2016 *Enquête Teruti-Lucas 2006-2015*. Disponible à l'adresse : <http://37.235.92.116/enquetes/territoire-prix-des-terres/enquete-teruti-lucas-resultats/>
- AKUOENERGY, 2014. *Les cedres* [en ligne]. 12 novembre 2014. [Consulté le 25 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.akuoenergy.com/fr/les-cedres>
- BARON, Guildas, MARCOTTE, Alexis et MALTERRE, Marie-France, 2020. *Photovoltaïsme au sol : Les panneaux de la discorde*. 15 mai 2020. N° 3852, pp. 45-51.
- BARRON-GAFFORD, Greg A., PAVAO-ZUCKERMAN, Mitchell A., MINOR, Rebecca L., SUTTER, Leland F., BARNETT-MORENO, Isaiah, BLACKETT, Daniel T., THOMPSON, Moses, DIMOND, Kirk, GERLAK, Andrea K., NABHAN, Gary P. et MACKNICK, Jordan E., 2019. *Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands* [en ligne]. Septembre 2019. [Consulté le 30 avril 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/335583033_Agrivoltaics_provide_mutual_benefits_across_the_food-energy-water_nexus_in_drylands#:~:text=Agrivoltaics%20provide%20mutual%20benefits%20across%20the,energy–water%20nexus%20in%20drylands&text=The%20vulnerabilities%20of%20our%20food,food%20production%20a%20fundamental%20challenge.
- BFM TV, 2019. *La Pugère : BFM*, 30 juillet 2019. [Consulté le 15 mai 2020]. Disponible à l'adresse : https://youtu.be/AmwriegcS-8Directors:_:n111
- BOCHU, Jean-Luc, 2003. *Energies et agriculture : de la maîtrise de l'énergie aux énergies renouvelables*. Educagri Editions. ISBN 978-2-84444-287-1. Google-Books-ID : zjwAibpzT4C
- CEREMA Hauts-de-France. *L'artificialisation et ses déterminants d'après les Fichiers fonciers - Période 2009-2018*. Disponible à l'adresse : <https://artificialisation.biodiversitetousvivants.fr/sites/artificialisation/files/fichiers/2020/06/rapport%20V3%20complet.pdf>
- Commissariat général au développement durable. *Évaluation du taux d'artificialisation en France : comparaison des sources Teruti-Lucas et fichiers fonciers*. Août 2019. Disponible à l'adresse : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-08/datalab-56-evaluation-du-taux-d-artificialisation-en-france-aout2019.pdf>
- CHAMBRES D'AGRICULTURE, 2012. *Transition énergétique, les chambres d'agriculture en action*. Novembre 2012. N° 1017, pp. 11 à 30.



CIWF, 2020. Animaux d'élevage. *ciwf.fr* [en ligne]. 2020. [Consulté le 3 août 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.ciwf.fr/animaux-delevage/>

CLAESSENS, Bruno, 2020. L'agrivoltaïsme sort de l'ombre et stimule les rendements agricoles. *Révolution Énergétique* [en ligne]. 13 avril 2020. [Consulté le 10 août 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.revolution-energetique.com/lagrivoltaisme-sort-de-lombre-et-stimule-les-rendements-agricoles/>

COLLET, Philippe, 2020. Politique énergétique : la PPE et la SNBC sont publiées. *Actu-Environnement* [en ligne]. 23 avril 2020. [Consulté le 5 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.actu-environnement.com/ae/news/politique-energie-publication-PPE-SNBC-35376.php4>

DEBOYSER, Bernard, 2020. Suisse : rendement record pour la technologie photovoltaïque développée par Insolight. *Révolution Énergétique* [en ligne]. 6 août 2020. [Consulté le 10 août 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.revolution-energetique.com/suisse-rendement-record-pour-la-technologie-photovoltaique-developpee-par-insolight/>

DÉCRYPTER L'ÉNERGIE, 2020. Les installations photovoltaïques émettent-elles des rayonnements nuisibles pour l'homme ou pour les animaux ? *Décrypter l'énergie* [en ligne]. 25 mars 2020. [Consulté le 3 août 2020]. Disponible à l'adresse : <https://decrypterlenergie.org/les-installations-photovoltaïques-emettent-elles-des-rayonnements-nuisibles-pour-lhomme-ou-pour-les-animaux>

DINESH, Harshavardhan et PEARCE, Joshua, 2016. The Potential of Agrivoltaic Systems. Février 2016. N° 54, pp. 299-308. DOI 10.1016/j.rser.2015.10.024. [archives-ouvertes.fr](https://www.archives-ouvertes.fr)

DUPRAZ, Christian & MARROU, Hélène & TALBOT, Grégoire & DUFOUR, L. & NOGIER, A. & FERARD, Y.. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*. 36. 2725-2732. 10.1016/j.renene.2011.03.005.

EDERA.DIGITAL, 2020. REM Tec - La soluzione per il fotovoltaico legata all'agricoltura. *remtec.energy* [en ligne]. 2020. [Consulté le 3 août 2020]. Disponible à l'adresse : <https://remtec.energy/fr/agrovoltaico/installations/29-borgo-virgilio>

ELAMRI, Yassin & CHEVIRON, Bruno & MANGE, Annabelle & DEJEAN, Cyril & LIRON, François & BELAUD, G.. (2017). Rain concentration and sheltering effect of solar panels on cultivated plots. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 1-37. 10.5194/hess-2017-418. Cockshull et al., *Journal of Horticultural science*, 1992

EUROSTATS, 2016. Artificialisation des sols. *Gouvernement.fr* [en ligne]. 6 décembre 2016. [Consulté le 20 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.gouvernement.fr/indicateur-artificialisation-sols>

FRAUNHOFER ISE, avril 2019. Agrophotovoltaïques: High Harvesting Yield in Hot Summer of 2018. Disponible à l'adresse: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/press-releases/2019/1019_ISE_e_PR_Agrophotovoltaics.pdf

GOETZBERGER, Adolf et ZASTROW, A, 1981. *On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation*. 15 février 1981. Harwood Academic Publishers

GUESDON, Dorine, 2020. BayWa r.e. poursuit l'agrivoltaïsme aux Pays-Bas. *baywa-re.fr* [en ligne]. 30 juillet 2020. [Consulté le 3 août 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.baywa-re.fr/fr/entreprise/actualites/details/baywa-re-poursuit-lagrivoltaïsme-aux-pays-bas/Agrivoltaïsme>

IFOP pour Photosol, Les français et le photovoltaïque, janvier 2020 Disponible à l'adresse : <https://www.ifop.com/wp-content/uploads/2020/03/116951-Pr%C3%A9sentation-pour-site-Internet.pdf>

KREUTZMANN, Anne, 2017. Eine Insel mit swei Bergen. Juin 2017. pp. 30 à 33.

LE DOMAINE DE NIDOLÈRES, [sans date]. *Projet Viti-Photovoltaïque au Domaine de Nidolères (Roussillon)*.



MARROU, Hélène, GUILLIONI, Lydie, DUFOUR, L. et DUPRAZ, Christian, 2012. Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? [en ligne]. 15 janvier 2012. Vol. 152. Disponible à l'adresse : www.elsevier.com/locate/agrformet

MARROU, Hélène, WERY, Jacques, DUFOUR, Lydie et DUPRAZ, Christian, 2013. Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *European Journal of Agronomy*. 2013. N° 44, pp. 54 à 66. archives-ouvertes.fr

MAURICE, Louis, 2020. Les trackers solaires Okwind. *OKWIND* [en ligne]. 2020. [Consulté le 3 août 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.okwind.fr/trackers.html>

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE, 2020. Programmations pluriannuelles de l'énergie (PPE). *Ministère de la Transition écologique et solidaire* [en ligne]. 23 avril 2020. [Consulté le 5 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/programmations-pluriannuelles-lenergie-ppe>

PETITPAIN, Luc et DREZET, Alix, 2019. *Cadre régional pour le développement des projets photovoltaïques en Provence-Alpes-Côte d'Azur* [en ligne]. DREAL PACA. [Consulté le 4 mai 2020]. *energie*. Disponible à l'adresse : http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/cadre_regional_photovoltaique_dreal_paca_2019_02.pdf

POIRIER, Clémentine et PHILIPPOT, Marc, 2012. Calculateur de charge en bétail. *paturage.be* [en ligne]. 16 juin 2012. [Consulté le 3 août 2020]. Disponible à l'adresse : http://www.paturage.be/paturage/gestion_pre/calculateur.html

POULIQUEN, Fabrice, 2020. L'agrivoltaïsme met les panneaux solaires au service des cultures. *20minutes.fr* [en ligne]. 10 juillet 2020. [Consulté le 3 août 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.20minutes.fr/planete/2812707-20200710-agrivoltaisme-quand-panneaux-solaires-mettent-service-cultures>

QUATTROLIBRI, 2009. *Implantation de panneaux photovoltaïques sur terres agricoles*. Rapport Solaire.

QUÉRO, Soizic, 2017. Élevage. À Lamballe, l'aviculteur Yves-Marie redouble d'innovation. *Ouest-France.fr* [en ligne]. 4 janvier 2017. [Consulté le 25 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.ouest-france.fr/bretagne/landehen-22400/pres-de-lamballe-l-aviculteur-yves-marie-redouble-d-innovation-4717183>

RBA, 2020. RÉSEAU BIODIVERSITÉ pour les ABEILLES [en ligne]. 2020. [Consulté le 7 août 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.reseau-biodiversite-abeilles.fr/>

SCHINDELE, Stephan, 2019. *Agrophotovoltaics : High Harvesting Yield in Hot Summer of 2018*. Freiburg : Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE.

SEKIYAMA, T.; NAGASHIMA, A. Solar Sharing for Both Food and Clean Energy Production: Performance of Agrivoltaic Systems for Corn, A Typical Shade-Intolerant Crop. *Environments* 2019, 6, 65.

STEVER Hermann, KUHN Jochen, OTTEN Christoph, WUNDER Bernd, HARST Wolfgang, 2005. Modifications du comportement des abeilles sous l'effet d'exposition électromagnétique . Disponible à l'adresse : http://www.mieliditalia.it/download/abeilles_dect.pdf

SUN'AGRI, 2020. Agrivoltaïsme : un outil de protection des cultures. *Sun'Agri* [en ligne]. 2020. [Consulté le 13 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://sunagri.fr/>

TALPIN, Juliette, 2010. *Economies d'énergie sur l'exploitation agricole*. France Agricole Editions. ISBN 978-2-85557-172-0. Google-Books-ID: ZgzZbgWVMkC

TROMMSDORFF, Maximilian, 2016. *An economic analysis of agrophotovoltaics: Opportunities, risks and strategies towards a more efficient land use*. 30 décembre 2016. The Constitutional Economics Network Working Papers.



VALDEBOUZE, Coralie, 2017. Note complémentaire à l'étude d'impact environnementale du projet photovoltaïque « FPV JANAR ». 12 décembre 2017. pp. 10.

YOUNAS Rehan & IMRAN Hassan & RIAZ Muhammad HUSSNAIN & BUTT Nauman. (2019). Agrivoltaic Farm Design : Vertical Bifacial vs. Tilted Monofacial Photovoltaic Panels.

Etudes ENCIS Environnement

CENTRALE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE DE GRATEYROLLES - SUIVI ENVIRONNEMENTAL, ENCIS Environnement, 2018

ETUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT ET LA SANTE PUBLIQUE PROJET PHOTOVOLTAÏQUE DE SAINT-VINCENT-SUR-OUST - ETUDE PREALABLE AGRICOLE - Projet de centrale photovoltaïque au sol de Saint-Vincent-sur-Oust (56), ENCIS Environnement, 2018

ETUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT ET LA SANTE PUBLIQUE, Projet de centrale photovoltaïque au sol de la Sénégalie (87), ENCIS Environnement, 2018

ETUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT ET LA SANTE PUBLIQUE, Projet de centrale photovoltaïque au sol de Fontenet (17), ENCIS Environnement

Suivi écologique d'exploitation du parc solaire de Fontenet 1 - BAY WA RE

Suivi écologique du parc solaire dont analyse de la repousse du couvert végétal – parc solaire construit de Grateyrolle (87) Solaire Direct

Etudes préalables agricoles en cours : Tourneuve-Lubbans-Aubusson-Oradour-Fanais

Sites internet consultés

<https://www.20minutes.fr/planete/2812707-20200710-agrivoltaisme-quand-panneaux-solaires-mettent-service-cultures>

<https://www.actu-environnement.com/ae/news/centrales-photovoltaiques-sol-conflits-usage-defrichage-agriculture-acceptabilite-26602.php4>

<https://www.actu-environnement.com/ae/news/agrivoltaisme-total-quadrans-next2sun-panneaux-bifaciaux-35223.php4>

<https://www.akuoenergy.com/fr/agrinergie>

<https://www.akuoenergy.com/fr/documents/getPdf/1479826327-5.pdf>

<https://decrypterlenergie.org/les-parcs-solaires-photovoltaiques-au-sol-consomment-ils-des-terres-agricoles>

https://energie-partagee.org/wp-content/uploads/2020/01/2101_Webinaire_PV_Versionfinale.pdf

<https://www.facebook.com/228815037159496/posts/3801108256596805/>

<https://www.facebook.com/GroenLeven/videos/325623955132138/?v=325623955132138>

https://m.huffingtonpost.fr/entry/panneaux-solaires-a-dessus-plants-tomates-idee-genie_fr_5d725a3ce4b03aabe35b2204

<https://www.ifop.com/publication/les-francais-et-le-photovoltaique/>

www.inra.fr/Entreprises-Monde-agricole/Resultats-innovation-transfert/Toutes-les-actualites/systemes-agrivoltaiques

<https://hofgemeinschaft-heggelbach.de/>

<https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2019/agrophotovoltaics-high-harvesting-yield-in-hot-summer-of-2018.html>

<http://46.29.123.56/IMG/pdf/primeur326.pdf>

<https://www.lafranceagricole.fr/elevage/des-parcours-ombrages-amoinde-cout-1,0,3835344329.html>

<https://www.lechodusolaire.fr/lagrivotvoltaique-prouve-sa-faisabilite-economique/>

<https://www.lemondedelenergie.com/agrivoltaisme-halte-destruction-terres-agricoles/2019/08/23/>

<https://www.lindependant.fr/2016/12/22/a-torreilles-sous-les-serres-photovoltaiques-on-fait-du-bio,2283019.php>

<https://www.linkedin.com/company/agrivoltaique/>

https://www.linkedin.com/posts/thierry-muller-27199457_enr-solaire-transitionaeznergaeztique-activity-6630866436699107328-akxh

<https://next2sun.de/#DasKonzept>

<https://objectif-languedoc-roussillon.latribune.fr/economie/environnement/2019-12-06/bassin-de-thau-le-plus-grand-projet-mondial-d-ombrieres-flottantes-en-gestation-834821.html>

<https://www.okwind.fr/trackers.html>



<https://ombrea.fr/la-solution-ombrea/>
<https://projects.arcelormittal.com/solar>
<https://www.pv-magazine.fr/2019/08/13/lagrivoltaïsme-un-atout-pour-lagriculture-et-pour-lefficacite-des-panneaux/>
<https://www.pv-magazine.fr/2020/03/31/premiers-resultats-de-lexperimentation-agrivoltaïque-de-sunagri-a-piolen/>
<https://www.renewableenergyworld.com/2013/10/10/japan-next-generation-farmers-cultivate-agriculture-and-solar-energy/>
<https://www.sudouest.fr/2011/01/11/une-centrale-solai-re-contestee-287079-4723.php>
<https://sunagri.fr>
<https://www.pv-magazine.com/2019/09/03/food-crops-do-better-in-the-shade-of-solar-panels/>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211501103X>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211501103X?via%3Dihub>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148111001194>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213138817302096>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261918304197>
<https://www.vitisphere.com/actualite-91285-Premiers-resultats-concluants-sur-lombrage-photovoltaïque.htm>
https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/70121/5015_WCCA_FSD_2011.pdf?sequence=1&is#page=219
https://fr.wikipedia.org/wiki/AgriVolta%C3%AFque#cite_note-14

Colloques et webinaires

BCTG Avocats, Réussir son projet agrivoltaïque : quel cadre juridique ? 29 septembre 2020

INES, Solaire, transition agricole et énergétique, les conditions de la réussite, Mardi 5 novembre 2019

AgriVoltaics2020, conférence et exhibition, 14-16 octobre 2020, <http://www.agrivoltaics-conference.org/home.html>

Office franco-allemand pour les énergies renouvelable Séminaire sur l'agrivoltaïsme en France et en Allemagne, 12 octobre 2018 Paris/La Défense



Annexe : Résumés de présentations du colloque Agrivoltaics 2020

Agrivoltaics2020, conférence et exhibition, 14-16 octobre 2020

<http://www.agrivoltaics-conference.org/home.html>

Pourquoi l'agrivoltaïque?

L'agrivoltaïque combine l'utilisation agricole du sol avec la production d'énergie électrique par photovoltaïque. Il offre la possibilité d'établir des solutions pour la production de cultures vivrières et, en même temps, la production d'électricité en tenant compte de la protection des sols et des économies d'eau. Il permet ainsi une solution efficace à plusieurs problèmes liés au changement climatique.

Qu'est-ce que la conférence Agrivoltaics?

Des systèmes agrivoltaïques ont été installés avec succès dans certains pays, et le moment est venu de connecter la communauté scientifique et de promouvoir les échanges internationaux pour faire progresser les systèmes et la technologie.

La conférence Agrivoltaics est la première conférence internationale sur ce sujet. Il couvrira tous les aspects, de la science à l'application, reflétant le large éventail thématique. Le programme comprendra des présentations scientifiques, choisies dans un processus de révision, et des conférences invitées de haut niveau.

Une exposition et une visite technique des installations, des installations d'essai innovantes aux meilleures pratiques, compléteront le programme.

Qui sont les organisateurs derrière cela?

Les initiateurs de la conférence sont les instituts scientifiques INRAé de France et Fraunhofer ISE d'Allemagne, ainsi que PSE Conferences, un organisateur de conférence spécialisé dans les énergies renouvelables.

Nous avons réalisé plusieurs résumés des conférences ci-après.

Systemes agrivoltaïques : pourquoi ne pas donner la priorité aux cultures qui poussent dans l'obscurité ?

Présentation de Brecht Wilcox (KU Leuven, Technologie campus Gent).

L'auteur de l'étude s'intéresse aux cultures ne nécessitant pas ou peu de lumière et leur combinaison avec un système agrivoltaïque. Il part en effet du constat que de nombreuses études ont été réalisées sur des cultures sous panneaux (positionnés relativement haut, à 4 ou 5 mètres de hauteur) ayant des besoins modérés de lumière, et sur des panneaux laissant passer suffisamment de rayons du soleil pour assurer un rendement suffisant.

Le projet sur lequel l'étude est basée est de coupler une production d'asperges blanches, nécessitant peu de lumière, avec des panneaux très proches du sol, afin d'augmenter le potentiel de production électrique.

L'étude est menée en partenariat entre l'Université de Louvain et des porteurs de projets agrivoltaïques, et financé par l'Agence pour l'Innovation et l'Entreprenariat.

Dans le cadre du projet d'étude, les couvercles sont remplacés par des panneaux photovoltaïques, relativement proche du sol. Les panneaux permettent ainsi d'apporter de l'ombre aux plantes, et de favoriser la création d'un microclimat favorable au rendement puisque cela permet d'étaler dans le temps la récolte. De même, les panneaux permettent de protéger les cultures des fortes chaleurs, et de limiter l'apparition de mauvaises herbes.

Les résultats des premières simulations montrent qu'il n'y a pas d'effet négatif de l'ombrage sur les cultures. En revanche, entre juillet et octobre, les plantes créées de l'ombrage sur les panneaux, la production énergétique diminuant ainsi de 40% sur la période (ramener sur l'année, la production est réduite de 20% par rapport à une installation où l'ombrage est absent).



Fig. 1: Crop cycle of white asparagus, from left to right: re-arrangements of the beds, placement of the plastic covers, cultivation of the crops, and finally, removal of the plant foliage after the summer.

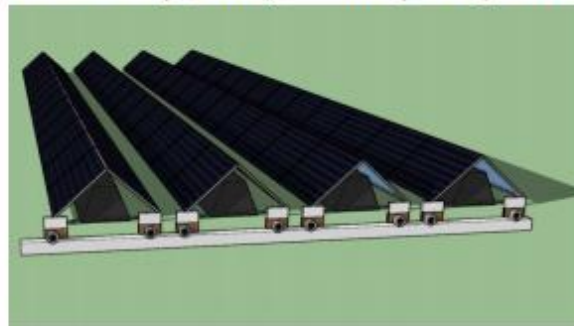


Fig. 2: Solar modules used as replacement for the plastic covers, the structure is equipped with wheels and a rail to quickly install or remove them.



Fig. 3: The wheel-rail based design makes it easy to fold the PV structure together when farming practices are needed (in this figure, as example, beds are created).

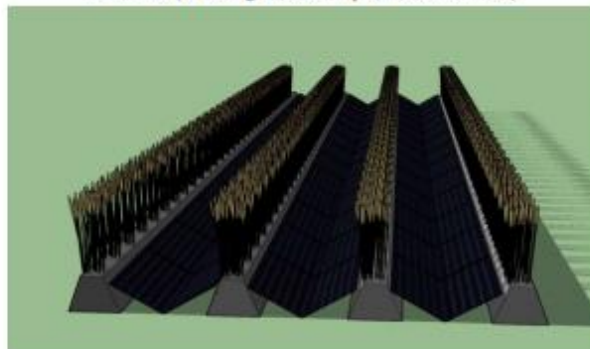


Fig. 4: The PV modules can be placed during summer between the beds, limiting growing of weeds.

Figure 1 : Schémas représentant le système agrivoltaïque disposé sur les asperges (Source : Wilcox et al., 2020)

Compétitivité des structures agri-photovoltaïques. Résultats d'études de cas avec des cultures de framboises aux Pays-Bas

Présentation de Stephan Schindele (Head of Agri-PV, Bay WA.r.e) et Willem de Vries (Project Manager AgriPV, GroenLeven)

La présentation a pour but d'apporter des éléments de réponses sur les coûts et les rendements de structure agrivoltaïque. Les cas d'études sont centrés sur la combinaison de panneaux photovoltaïques « mobiles » au-dessous desquels sont cultivés des framboisiers.

L'un des objectifs de la recherche menée par les auteurs est d'apporter des réponses sur les couts et rendements réels de ce type de structure, afin d'aider à la mise en place de politique de développement cohérente pour ce type de structure.

La méthodologie de recherche s'appuie sur un « calculateur » mis en place par le think-tank « Agora Energiewende », et adapté au contexte du projet : les données relatives aux structures photovoltaïques mobiles, les données de production des framboisiers ainsi que les contexte réglementaire néerlandais de production et de vente d'électricité verte sur le réseau.

Pour mener à bien cette recherche, deux parcelles ont été étudiées : la première, d'une surface de 3,3 ha, combinant culture de framboisier et panneaux photovoltaïques mobiles, la seconde où des framboisiers sont cultivés de façon standard. Les deux parcelles, taille identique, sont situées à Zevenaar. Les températures maximales mesurées durant les mois de culture sont échelonnées entre 17,4 et 22,5 °C (de mai à aout), tandis que les minimales mesurées étaient de 9,1 à 13,1 °C sur la même période.



Photographie 1 : Plantations de framboisiers sous structures photovoltaïques (Source : Schindele et de Vries, 2020)

Les panneaux installés représentent une puissance totale de 2,7 MWc, orientés est-ouest. La production attendue est de 906 kWh/kWc, soit un rendement d'environ 2 400 MWh annuel. Les modules ne recouvrent pas entièrement les cultures de framboises, mais elles permettent toutefois de les protéger des aléas climatiques (grêle par exemple). Il est attendu une production de framboise sous panneaux équivalente à 90% de la production qu'il peut y avoir sous serre.

Les résultats montrent que la production d'électricité est plus rentable avec ce type de structure qu'avec des panneaux disposés sur les toitures de bâtiments (dans le contexte tarifaire

néerlandais), mais sont moins rentables que les parcs photovoltaïques au sol. Par ailleurs, ils mettent en avant les résultats suivants :

- les risques de stress thermique (sécheresse) diminuent grâce à la protection des panneaux photovoltaïques ;
- les structures photovoltaïques, en période froide, permettent de retenir la chaleur du sol et, en période chaude, de limiter les très hautes températures offrant meilleure stabilité thermique sous les panneaux (contrôlée avec des outils), et donc un microclimat bénéfique à la plante ;
- les structures photovoltaïques offrent une protection contre le vent ;
- le rendement est meilleur avec les framboises qu'avec les pommes, les poires ou les cerises. Les pommiers, les poiriers et les cerisiers, étant plus hauts, l'investissement pour les structures photovoltaïques est supérieur. De plus, les framboises n'ont pas besoin de beaucoup de lumière contrairement aux pommes par exemple ;
- ce type de projet est positif pour le fermier : l'électricité est autoconsommée, sa production de fruits est bonne.

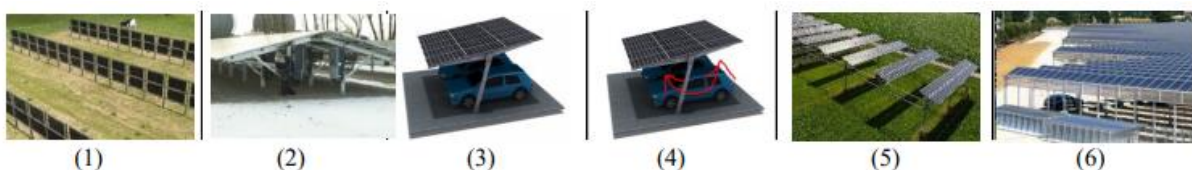
Les auteurs concluent que ce type de système peut être compétitif à l'avenir si les coûts d'installations et d'exploitation sont diminués, et si des programmes de recherche et développement sont menés sur le sujet. Même si la rentabilité de la production d'électricité via ce type de système est plus faible que des parcs solaires au sol, elle peut être combinée à une production agricole rentable. Cela pose la question de l'utilisation des terres agricoles, l'agrivoltaïsme pouvant permettre de trouver un équilibre économique, environnemental et social.

Centrales photovoltaïques et zones agricoles : évaluation du système pour le cas autrichien

Présentation de Christoph Mayr, Shokufeh Zamin, Stephan Abermann (AIT Austrian Institute of Technology, Center for Energy) et Thomas Alexander (Wien Energie GmbH)

L'objectif de l'étude est d'évaluer les potentialités de l'agrivoltaïsme en Autriche, dans un contexte où les énergies renouvelables devront couvrir la totalité de la consommation électrique des ménages d'ici 2030. L'objectifs fixé par le pays pour le solaire photovoltaïque est d'atteindre une production de 11 TWh pour 2030.

Pour évaluer les potentialités de développement de l'agrivoltaïsme, six systèmes ont été testés (panneaux bifaciaux (1), panneaux disposés horizontalement orientés au sud (2) ou est-ouest (3), modules avec système de suivi (4), structures en « treillis » (5) ou structures sur serres (6)) :



Photographie 2 : Systèmes agrivoltaïques testés (Source : Mayr et al., 2020)

Une comparaison des différents systèmes photovoltaïques et des structures de montage respectives a été élaborée. Une ingénierie mécanique de chaque structure de montage a été réalisée afin d'estimer le matériau de construction et d'identifier les coûts correspondants. La Figure 2: Structures (à gauche) et Comparaison des coûts pour l'ensemble des structures analysées (à droite) montre la quantité d'acier nécessaire et les coûts d'installation correspondants, tandis que les coûts des modules PV ne sont pas inclus. La Figure 2 montre la comparaison des coûts de toutes les structures de montage analysées : les coûts de la disposition de table standard sur 5 m de hauteur (systèmes 2 et 3) sont les plus bas dans cette analyse, sur la base des prix indicatifs de l'acier en Autriche. Une solution de serre (système 6) avec système photovoltaïque intégré est la plus coûteuse, mais elle a bien sûr des fonctionnalités supplémentaires. Une évaluation détaillée du rendement (réalisée avec un logiciel de simulation) est détaillée Figure 3.

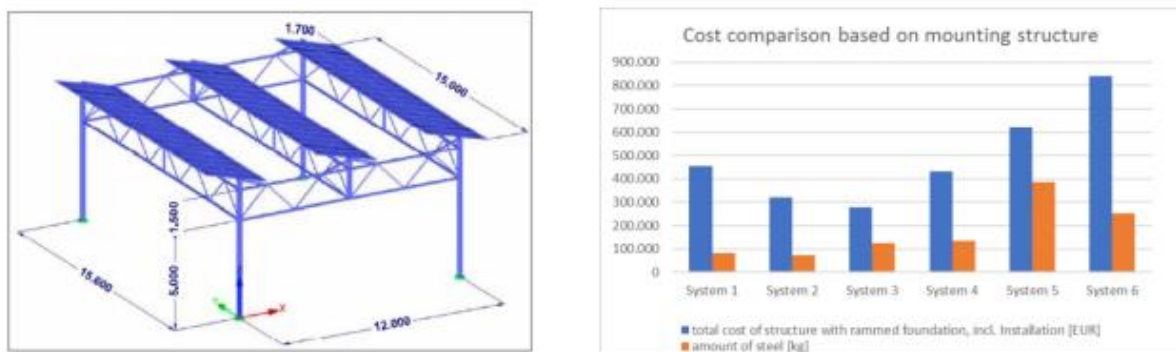


Figure 2 : Structures (à gauche) et Comparaison des coûts pour l'ensemble des structures analysées (à droite)

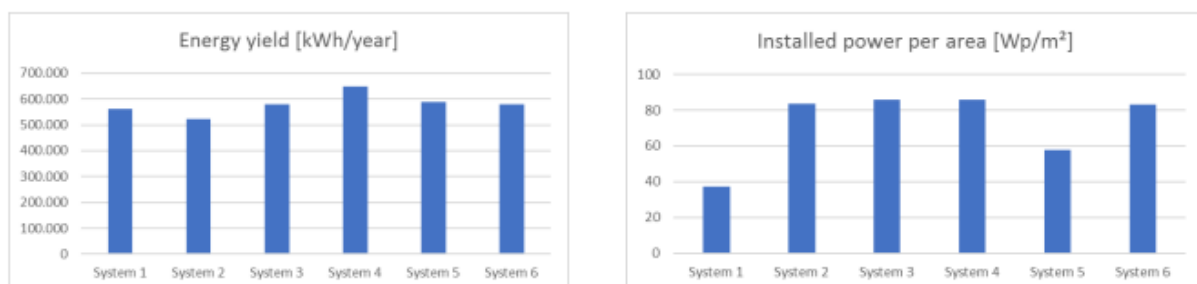


Figure 3 : Rendements énergétiques annuels (à gauche) et Surface d'utilisation de l'espace des différentes structures agrivoltaïques (à droite)

Les auteurs concluent que pour la mise en place d'un système agrivoltaïque, il convient de prendre en compte la production électrique potentielle, la surface d'utilisation et les coûts inhérents au système agrivoltaïque et de trouver un équilibre entre ces trois éléments. De même, il faut prendre en compte les spécificités du site d'implantation (que ce soit pour la culture ou pour la production d'électricité) et celles de la culture associée, afin d'adapter le projet au territoire.

Évaluation des compromis au sein des approches agrivoltaïques dans les régions semi-arides

Présentation de Greg A. Barron-Gafford et al (. School of Geography & Development, University of Arizona, Tucson)

(Résumé traduit de l'anglais)

Les municipalités et les États des régions semi-arides recherchent de plus en plus des stratégies de résilience pour gérer la croissance démographique et la demande de nourriture et d'énergie, dans un climat changeant qui menace la dépendance historique à l'égard de la diminution des sources d'eau et peut réduire la capacité de production alimentaire et d'énergie renouvelable. Est-il possible de parvenir à un développement durable tout en améliorant simultanément la sécurité de la production alimentaire et renouvelable et en réduisant la consommation d'eau ?

Le sud-ouest semi-aride des États-Unis fournit une part substantielle de la production alimentaire, y compris les légumes et les cultures fourragères, mais le fait grâce à une utilisation importante de l'eau. La Californie reste le premier État en termes de recettes agricoles monétaires avec 34,8 milliards de dollars de revenus, mais l'agriculture de la Californie et de l'Arizona a utilisé le plus grand pourcentage d'eau souterraine dans l'utilisation totale de l'eau agricole dans le sud-ouest des États-Unis. Les pénuries d'eau ont commencé à influencer les pratiques, et l'abandon des terres agricoles est un défi croissant car une grande partie de l'agriculture est de moins en moins viable économiquement dans les régions semi-arides. Dans le même temps, la production d'énergie à partir d'installations photovoltaïques (PV) à grande échelle a augmenté de façon exponentielle au cours des dernières décennies, ce qui signifie une augmentation de la rentabilité et l'adéquation au réseau de cette technologie. D'ici 2030, l'installation solaire aux États-Unis pourrait atteindre 330 GW de capacité installée (dont 2/3 devrait être au sol), ce qui nécessiterait environ 8 000 km² de terrain. Néanmoins, la restriction de l'emplacement des installations photovoltaïques en raison de politiques climatiques, techniques et sociopolitiques est devenue un défi majeur pour un déploiement à grande échelle. Un discours entre la production alimentaire et la production d'énergie photovoltaïque aggrave inutilement les problèmes liés à l'allocation d'espace, d'eau et de capital pour le développement de stratégies de résilience. Notre hypothèse globale est que la co-implantation de l'agriculture et du photovoltaïque - agrivoltaïque - représente une opportunité sous-utilisée pour augmenter simultanément la production alimentaire et énergétique tout en réduisant la consommation d'eau.

L'étude de cas menée dans le sud-ouest semi-aride des États-Unis suggère que la co-implantation de l'énergie photovoltaïque agricole et solaire pourrait produire plusieurs avantages directs et indirects importants pour les systèmes d'alimentation, d'énergie et d'eau. Celles-ci incluent la maximisation de l'efficacité de l'eau utilisée pour l'irrigation des plantes en diminuant l'évaporation du sol et la transpiration du couvert végétal, ainsi que la prévention de la dépression de midi et de l'après-midi dans la photosynthèse due à la chaleur et au stress de déficit de pression de vapeur. Dans de nombreuses régions arides et semi-arides, l'intensité lumineuse est beaucoup plus élevée que la capacité des plantes agricoles, et dans les environnements à forte irradiance, certains ombrages peuvent ne pas réduire la croissance. L'ombrage pendant les périodes estivales

est une technique largement appréciée pour faciliter la production de nombreuses cultures - les maisons à lattes sont une approche répandue qui utilise l'ombrage pour favoriser la croissance des légumes dans des environnements à fort rayonnement. En hiver, les infrastructures photovoltaïques permettent d'augmenter les températures locales sous le couvert du générateur et réduit les risques de gel. De plus, les chercheurs ont constaté que l'ombrage réduisait considérablement les besoins en irrigation, en particulier pendant l'été. Les chercheurs émettent l'hypothèse qu'un système agrivoltaïque à l'échelle de la ferme entraînera une réduction des coûts d'électricité grâce à une réduction des coûts d'acquisition de terrains et de permis - suffisants pour compenser les coûts structurels supplémentaires liés à l'élévation du réseau.

Production végétale sous l'ombre partielle des panneaux solaires photovoltaïques

Présentation de Timothy J. Hudelson et J. Heinrich Lieth (Plant Sciences MS2, UC Davis)

Les auteurs travaillent sur un système photovoltaïque mobiles créant de l'ombrage pour les cultures situées en dessous, afin de vérifier les besoins d'irradiation des plantes.

Leurs travaux de modélisation pour la croissance et le développement des cultures sous des panneaux solaires photovoltaïques ont montré que l'ombre partielle peut être tolérée par les cultures. De même, les températures extrêmes sous les panneaux solaires sont atténuées et les panneaux solaires peuvent aider à la production agricole en réduisant la consommation d'eau, tant que le niveau d'ombre n'est pas trop extrême. Les auteurs ont initié leurs travaux suite à des rapports récents montrant une croissance mesurée des plantes sous des systèmes photovoltaïques, mais qu'il est nécessaire d'avoir plus d'informations pour identifier la viabilité économique des divers systèmes agrivoltaïques. En outre, la base de connaissances sur la tolérance à l'ombre des cultures agricoles pertinentes est rare. Ils ont mené une étude pour identifier les cultures qui auraient une perte de productivité minimale, tout en positionnant les panneaux à diverses positions (et niveaux d'ombre) dans un réseau composé de panneaux solaires photovoltaïques montés sur un tracker.

Deux sites, situés en Californie (à Davis), ont été expérimentés : le premier système était orienté à l'ouest, le second à l'est. Six cultures ont été cultivés sous ces installations (chou frisé, bette à carde, brocoli, poivron, tomate, épinard). Des mesures étaient réalisées au niveau des plantes (humidité, température). De même, les modules ont été orientés afin de procurer des ombrages différents et ainsi repérer les moments les plus propices de production.

Les résultats montrent les sensibilités de chaque plante à l'ombrage en termes de production :

- à partir de 55% d'irradiation, le chou frisé, les blettes et les tomates ont une production similaire en conditions normales ;
- le brocoli a besoin d'au moins 85% de l'irradiation pour être récoltable ;
- les poivrons peuvent produire suffisamment à partir de 55% d'irradiation, jusqu'à 85% pour une production similaire à des plantations situés en plein soleil ;

- les épinards sont quant à eux très sensibles à l'ombrage (négativement pour la production), mais la production augmente de façon exponentielle en fonction de l'augmentation de l'irradiation.

Au cours d'une journée de 24 heures, les profils de température se sont synchronisés avec l'ombrage causé par le mouvement des panneaux. En général, les températures de l'air en dehors des structures étaient de 1 à 2°C plus chaudes que les témoins à l'ombre des panneaux (matin), mais étaient de 1 à 3°C plus froides que les témoins pendant la partie la plus chaude de la journée (après-midi), en particulier lors des périodes les plus chaudes de l'année.

Les résultats montrent que le microclimat créé grâce aux panneaux solaires est bénéfique pour les plantes, et varie en fonction du positionnement du panneau et de l'apport d'ombrage. Certaines cultures sont adaptées à des ombrages élevés (tomates, blettes, chou frisé). D'autres types de cultures seront testés dans le cadre de l'étude, des dispositifs de contrôle de l'ombrage et de suivi des cultures seront également affinés pour atténuer les variations des conditions microclimatiques présentes sous panneaux photovoltaïques.

Pertes de rendement des cultures dans les systèmes agrivoltaïques : des conditions microclimatiques favorables peuvent-elles compenser les effets d'ombrage négatifs ?

Présentation de Lisa Pataczek et al. (Center for Organic Farming, University of Hohenheim, Stuttgart, Germany)

(Résumé traduit de l'anglais)

Le rayonnement solaire devrait être l'un des facteurs limitants de la croissance des cultures sous un système agrivoltaïque. Actuellement, il y a peu de données disponibles sur l'effet d'ombrage de l'agrivoltaïsme sur le rendement des cultures. Une étude a montré que les pertes de rendement de la laitue sous système agrivoltaïque n'étaient que marginales en raison de la capacité de la culture à s'adapter à des conditions de faible luminosité. Les cultures moins adaptatives pourraient afficher de plus fortes pertes de rendement récoltables, cependant, les données ne sont toujours pas concluantes à ce jour. D'autres études ont montré que l'agrivoltaïsme peut affecter les conditions microclimatiques en abaissant les températures du sol sous les panneaux, ou en réduisant l'évapotranspiration, selon les espèces cultivées. Ainsi, l'objectif de l'étude était d'identifier si les conditions microclimatiques dans les systèmes agrivoltaïques pouvaient compenser les pertes de rendement des cultures en influençant par exemple le bilan hydrique en dessous des modules.

Afin de quantifier les effets de l'agrivoltaïsme sur les conditions microclimatiques et la production agricole, une installation agrivoltaïque pour la recherche située près du lac de Constance (Allemagne) a été créée en 2016, d'une superficie totale de 0,3 ha et d'une capacité de 194 kWc. Trois cultures différentes ont été sélectionnées, différant par leurs exigences pour une croissance optimale. En 2019, le blé, le trèfle et du céleri-rave ont été cultivés pour évaluer l'effet de l'agrivoltaïsme sur des paramètres environnementaux tels que la température et l'humidité de l'air, la température et l'humidité du sol, le rayonnement photosynthétiquement actif, les

précipitations et les rendements récoltables. Toutes les cultures ont été cultivées sous système agrivoltaïque et sur un site de référence adjacent (sans panneaux solaires) dans le même champ.

Les niveaux de précipitations et d'humidité du sol étaient plus élevés sous les modules solaires en pente que sur la zone de référence et entre les modules. Le rendement du trèfle a été réduit de 15% sous système agrivoltaïque. Le blé et le céleri-rave ont montré une baisse de rendement de -28% et -33%, respectivement, avec un rendement total en grains de blé d'environ 5 t ha⁻¹ et d'environ 20 t ha⁻¹ de céleri-rave sous système agrivoltaïque.

Les résultats suggèrent que les conditions microclimatiques n'ont pas pu compenser la perte de rendement basée sur la réduction du rayonnement solaire sous les panneaux en 2019. Cela pourrait être dû à une distribution hétérogène des précipitations sous les panneaux solaires, et donc aussi à l'humidité du sol dans le système, conduisant à croissance inégale, affectant le rendement des cultures. Étant donné que cet ensemble de données est basé sur une seule année, il peut être difficile d'extrapoler les résultats généraux applicables. Néanmoins, une humidité accrue du sol sous système agrivoltaïque pourrait augmenter les rendements des cultures dans les régions où les précipitations sont plus faibles, et bien que l'agrivoltaïsme puisse entraîner des pertes de rendement certaines années, l'efficacité d'utilisation des terres, avec la combinaison de la production agricole et de la production d'énergie sur un site est plus élevée par rapport à une séparation des deux types de production.

Effet de l'ombrage sur le développement phénologique des vignes

Présentation de Benjamin Tiffon-Terrade et al. (LEPSE, Univ Montpellier, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France)

L'objet de la recherche est d'apporter une solution viable pour la culture de la vigne, dont la production est dépendante des aléas et changements climatiques. Les systèmes agrivoltaïques disposés sur des cultures maraichères ayant fait leur preuve, les auteurs se penchent sur ce système pour des cultures de vigne.

Néanmoins, la vigne est une culture sensible, notamment dans ses besoins de soleil, peu de recherches ont été effectuées sur les besoins d'ombrage de ce type de culture.

Afin de combler cette lacune, une étude de 4 ans (2018-2021) est en cours sur deux sites expérimentaux. Le premier site est un vignoble tandis que le second est basé sur des vignes en pot où l'ombrage peut être appliqué à différents stades de développement de la vigne. L'étude visait à comparer les effets de la variation de l'ombre appliquée à différents stades du cycle végétal de la vigne. Les résultats porteront principalement sur les essais de vignes en pot où les réponses phénologiques et morphologiques ont été enregistrées.

Des mesures ont été effectuées au niveau des vignes (températures, humidité), les stades phénologiques du développement de la culture ont également été étudiés.

Les résultats montrent que le temps de développement des vignes en pot est plus long pour les plantes ombragées que pour les plantes témoins. Les vignes tendent à chercher la lumière (évitement de l'ombrage), les plantes s'adaptent ainsi aux conditions dans lesquelles elles sont cultivées.

Exigences d'irrigation et croissance des fruits des pommiers cultivés sous des panneaux photovoltaïques

Présentation de Perrine Juillion et al. (INRAE-UR1115, Site Agroparc, Avignon, France.)

Les auteurs ont mené une étude de cas sur la compatibilité de la production de pommiers sous des systèmes agrivoltaïques. La recherche, menée sur une période de trois ans, vise à comprendre l'effet de l'ombrage sur la production de pommes (état hydrique des arbres, besoins d'irrigation et croissance des fruits).

Quatre périodes ont été déterminées : période 1 (7 mai-26 juin), période 2 (26 juin-11 juillet), période 3 (11 juillet-22 août) et période 4 (22 août-13 septembre), et correspondent à la saison de croissance des fruits.

Les résultats montrent que les arbres cultivés sous panneaux avaient des besoins hydriques moins élevés durant les périodes 3 et 4 que des arbres cultivés normalement. L'ombrage n'a pas joué d'effet négatif sur la croissance des fruits, dans la mesure où elle était compensée par un meilleur état hydrique des arbres sous panneaux photovoltaïques. En revanche, la production tend à être plus faible pour les pommiers situés sous structures.

Pour conclure, les auteurs indiquent que la culture de pommiers sous structures photovoltaïques permet d'économiser de l'eau, mais la production tend à être moins élevée que pour des cultures « normales ». De même, il est nécessaire d'approfondir la recherche sur la croissance végétative des fruits, leur qualité, le retour de floraison afin d'évaluer la durabilité de ce type de culture.

Etude de la croissance des poires sous structure agrivoltaïque pliable

Présentation de Geun Ho Gim et al. (Solar Energy R&D Dept., Green Energy Institute, Korea)

(Résumé traduit de l'anglais)

Sur la base de la politique d'énergie renouvelable « RE3020 », le gouvernement de la République de Corée vise à développer environ 48,7 GW d'énergie renouvelable entre 2018 et 2030, dont 37 GW par le photovoltaïque. De plus, la situation en milieu rural se détériore d'année en année en raison du manque de travailleurs agricoles domestiques, du vieillissement de la population et de la baisse des revenus. Par conséquent, la recherche et le développement sur un système agrivoltaïque a commencé 2016, et jusqu'à présent, un système de démonstration d'environ 1 GW a été mis en place. Diverses études ont été menées telles que le développement de la structure, des modules photovoltaïques et des techniques agricoles standard pour diverses cultures (riz, chou, pomme de terre, ail, poire et raisins...).

Dans cette étude, le développement de la structure pliable et l'analyse de la croissance des poires ont été menées pour développer un système agrivoltaïque ciblé pour ce type de culture.

La structure support des modules photovoltaïques a les dimensions suivantes : une largeur et longueur de 14 m pour une hauteur de 4 m. la structure est conçue pour résister à des vents supérieurs à 30 m/s, la charge liée à la neige ainsi qu'aux aléas sismiques.

De l'hiver au printemps, la floraison des poires était relativement améliorée par rapport au groupe témoin, principalement en raison du blocage du gel et du froid par les modules PV

supérieurs. De plus, dans le cas de la fleur de poirier sous les modules PV, la période de floraison a augmenté d'environ 5 jours par rapport au groupe témoin, le taux de chute des poires a diminué d'environ 38% par rapport au groupe témoin lors du 13^e typhon « Lingling » en 2019.

L'examen de la quantité et de la qualité des fruits de poire sous les modules photovoltaïques en 2018 a montré que lorsqu'ils sont récoltés au même moment, la quantité par rapport au groupe témoin (4,4 tonnes) était d'environ 4,1 tonnes / 10 a (diminution de 6,7%). De plus, les poids individuels et la teneur en sucre des poires cultivées sous les modules PV ont également été réduits d'environ 4,5% et 1,3 ° Bx par rapport au groupe témoin. Bien que la quantité de rayonnement solaire atteignant les poires sous système agrivoltaïque ait été ajustée en utilisant le système d'entraînement pliable du module PV, la quantité et la qualité ont été réduites en raison du manque de rayonnement solaire atteignant la poire par rapport au groupe témoin. Cependant, à la suite de la maturation de la période de croissance de la poire sous panneaux solaires pendant environ 2 semaines, le poids individuel des fruits a augmenté d'environ 8,5% par rapport au groupe témoin, et la teneur en sucre (10,6 ° Bx) s'est également rapprochée (11,0 ° Bx).

Développement d'un système d'aide à la décision pour évaluer les performances des cultures sous panneaux solaires dynamiques

Présentation de Jérôme Chopard et al. (itk, France)

La société ITK, par l'intermédiaire de Jérôme Chopard, développe un système d'évaluation de plusieurs indicateurs agronomiques afin d'une part d'aider les fournisseurs de panneaux solaires à élaborer de structures adapter aux cultures, et d'autre part d'aider les producteurs agricoles à gérer les cultures.

Des indicateurs basés sur le comportement des plantes ont ainsi été créés afin d'avoir une vision précise de leurs besoins.

Un modèle a ensuite été établi afin de modéliser les interactions entre le sol, la plante et son environnement. Ce modèle repose sur des sous-modèles utilisant des algorithmes pour évaluer les quantités d'intrants nécessaires, la quantité d'eau, la température dont la plante a besoin.

Ce système de modélisation permettra, à terme d'aider à la gestion des cultures, mais aussi d'orienter les panneaux solaires en fonction de besoins de la plante.

Effets de la synergie écologique des systèmes agriphotovoltaïques

Présentation de Tobias Keinath et al. (Fraunhofer ISE, Research Assistant, B.Sc)

L'objectif de la recherche est de mesurer le développement des plantes, le rendement et la qualité des cultures sous système agrivoltaïque, mais aussi les effets sur la biodiversité et les conditions climatiques du sol et de l'air. Pour cela, des micro-stations climatiques ont été créées et divers capteurs de lumière au niveau du sol et à côté des modules ont été installés. D'autres configurations expérimentales étudient les effets des ombres des modules sur l'évaporation potentielle afin de prédire l'évapotranspiration réelle et la disponibilité de l'eau pour les cultures.

La biodiversité a été surveillée suite à la mise en place de projet agrivoltaïque. Au total, 59 espèces végétales ont été trouvées, avec une légère augmentation depuis le début du projet. Dans les zones périphériques, avec une culture moins intensive qu'au centre (forte densité de cultures), un plus grand nombre d'espèces a été détecté. Mais la répartition des espèces n'était pas homogène et les mauvaises herbes les plus communes se trouvaient principalement dans les deux zones. Par conséquent, des études supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre les impacts de l'agrivoltaïsme sur la biodiversité.



Parc ESTER Technopole
21 rue Columbia
87068 LIMOGES Cedex
Tel : 05 55 36 28 39

<http://www.encis-environnement.com>

ENCIS réduit et compense ses émissions de carbone