

Caractériser les projets photovoltaïques sur terrains agricoles et l'agrivoltaïsme

Etat de l'art bibliographique

Sept.
2021



EXPERTISES

REMERCIEMENTS

Les auteurs de ce guide souhaitent remercier les membres du comité d'experts et du comité de pilotage pour leurs contributions tout au long de cette étude, mais aussi tous les acteurs ayant pris part, de près ou de loin, à leurs réflexions et à leurs travaux même s'ils ne sont pas cités ci-dessous.

Comité de pilotage :

Julie Beelmeon (MTES – DGEC)
Maxence Chatelet (MTES – DHUP)
Vincent Delporte (MTES – DGEC)
Agnès Desoindre (MAA – DGPE)
Isabelle Feix (ADEME)
Céline Mehl (ADEME)
Léa Molinié (MAA – DGPE)
Rodolphe Morlot (ADEME)
Jean-Michel Parrouffe (ADEME)
Léa Peltret (MAA – DGPE)
Nicolas Tonnet (ADEME)

Comité d'experts :

Claude Baury (Chambre agriculture des Bouches du Rhône)
Hakima Bechoua (DRAAF Occitanie)
Nelsie Berges (SER)
Nicolas Berghmans (IDDRI)
Véronique de Billy (OFB)
Yves le Bissonnais (INRAE)
Aimé Bosq (Enerplan)
Isabelle Botrel (SAFER Occitanie)
Pierre-Emmanuelle Bournet (Agrocampus Ouest)
Marie Buchet (SER)
Alice Brasquies (AREC Occitanie)
Régis le Carlier (Chambre d'agriculture des Côtes d'Armor)
Enzo Casnici (Chambre d'agriculture ARA)
Bruno Charpentier (DREAL Bourgogne)
Virginie Charrier (La Coopération Agricole)
Pascal Chaussec (APEPHA)
Bruno Cheviron (INRAE)
Dorothée Cocozza (SAFER ARA)
Auréline Doreau (Ecole Nationale Supérieure du Paysage)
Jeanne Dupas (HESPUL)
Christian Dupraz (INRAE)
Samy Engelstein (SER)
Isabelle Feix (ADEME)
Hervé Flament (SAFER Occitanie)
Lola Godet (Chambre d'agriculture AURA)
Claire Goillon (APREL)
Ariane Grisey (CTIFL)
Raphaël Gros (Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie)
Jean-Marc Hamon (La Coopération Agricole)
Léonard Jarrige (Assemblée permanente des Chambres d'Agriculture)
Philippe Lauraire (SAFER PACA)
Anne-Laure Laroche (ASTREDHOR)
Bertrand Laroche (INRAE)
Richard Loyer (Enerplan)
Christophe Maillet (SAFER)
Joris Masafont (ADEME)
Simon Miquel (DRAAF Occitanie)
Bernard Moury (DDTM de l'Hérault)
Luc Petitpain (DREAL PACA)
Andreas Rudinger (IDDRI)
Anne-Sophie Servan (FNSAFER)
Marc Varchavsky (CER France)

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME, I Care & Consult, Ceresco, Cétiac. 2021. Caractériser les projets photovoltaïques sur terrains agricoles et l'agrivoltaïsme – Etat de l'art bibliographique. 141 pages.
Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 19MAR000225

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : I Care & Consult, Ceresco, Cétiac

Coordination technique - ADEME : MEHL Céline & TONNET Nicolas

Direction/Service : Direction Bioéconomie et Energies Renouvelables (DBER) / Service Réseaux et Energies Renouvelables

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	1
RÉSUMÉ	9
ABSTRACT	10
CLES DE LECTURE DU DOCUMENT	11
1. INTRODUCTION.....	12
1.1. Les enjeux de développement du photovoltaïque.....	12
1.2. Développement du photovoltaïque en secteur agricole: risques et opportunités pour les activités et filières agricoles.....	14
1.2.1. Adaptation des systèmes photovoltaïques aux spécificités du secteur agricole	14
1.2.2. Le risque d'artificialisation des sols agricoles.....	16
1.2.3. L'opportunité économique du photovoltaïque pour les agriculteurs	17
1.3. Un cadre réglementaire et fiscal français du photovoltaïque sur terrains agricoles complexe et sujet à interprétation.....	17
1.4. Une nécessité d'aboutir à un cadre clair et partagé issu d'une caractérisation objective du photovoltaïque sur terrains agricoles.....	18
2. PANORAMA DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES AGRICOLES DANS LE MONDE ET IDENTIFICATION DES SYSTEMES RETENUS POUR UNE CARACTERISATION APPROFONDIE.....	19
2.1. Méthodologie	19
2.1.1. Principes.....	19
2.1.2. Etude bibliographique.....	19
2.1.3. Suivi des initiatives sur l'agrivoltaïsme	20
2.1.4. Enquête auprès des développeurs photovoltaïques	20
2.1.5. Identification des systèmes photovoltaïques agricoles.....	20
2.1.6. Etude des systèmes photovoltaïques agricoles.....	21
2.2. Systèmes photovoltaïques agricoles identifiés.....	22
2.2.1. Systèmes avec centrales au sol	23
2.2.2. Systèmes avec ombrières fixes.....	25
2.2.3. Systèmes avec ombrières mobiles.....	27
2.2.4. Systèmes avec serres photovoltaïques.....	29
2.2.5. Autres systèmes	30
2.3. Systèmes photovoltaïques agricoles retenus pour une caractérisation approfondie	31
3. PERFORMANCE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES AGRICOLES... 32	
3.1. Méthodologie d'étude de la performance des systèmes photovoltaïques agricoles	32
3.2. Performance énergétique des systèmes photovoltaïques sur terres agricoles.....	32
3.2.1. Caractéristiques des installations et impacts sur la performance énergétique.....	32
3.2.1.1. Configurations des modules photovoltaïques	33
3.2.1.2. Modulation de l'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques.....	34
3.2.1.3. Technologies de modules photovoltaïques	35

3.2.1.3.1. Modules à microcellules solaires sphériques et prototypes de modules photovoltaïques semi-transparents et bifaciaux.....	35
3.2.1.3.2. Modules photovoltaïques semi-transparents OPV.....	36
3.2.2. Coût de production du photovoltaïque sur terrains agricoles.....	37
3.3. Effets de la présence de photovoltaïque sur les performances agricoles.....	40
3.3.1. Impacts du microclimat sur les résultats agronomiques.....	41
3.3.1.1. Influence de la diminution du rayonnement solaire sur les résultats agronomiques.....	41
3.3.1.2. Effets de la présence de photovoltaïque sur la température en période de croissance végétale.....	46
3.3.1.3. Impacts sur l'évapotranspiration et conséquences agronomiques.....	47
3.3.1.4. Impacts sur la pluviométrie au sol et la distribution spatiale de l'eau au sein de la parcelle cultivée.....	49
3.3.1.5. Impacts sur le vent au niveau de la parcelle.....	52
3.3.2. Interactions entre la structure photovoltaïque et l'activité agricole.....	52
3.3.3. Synthèse de l'impact agronomique de la présence de photovoltaïque sur des terres agricoles.....	54
3.3.3.1. Tableau récapitulatif des résultats issus des références bibliographiques.....	54
3.3.3.2. Conclusions.....	62
3.4. Effets environnementaux du photovoltaïque sur terrains agricoles.....	65
4. CADRE DU DEVELOPPEMENT DU PHOTOVOLTAÏQUE SUR TERRAINS AGRICOLES EN FRANCE.....	68
4.1. Mécanismes de soutien à l'énergie photovoltaïque.....	68
4.1.1. Historique du dispositif de soutien.....	68
4.1.2. Dispositif de soutien actuel.....	70
4.2. Cadre de la protection de l'espace agricole.....	73
4.2.1. La préservation de l'espace agricole à différentes échelles de planification.....	73
4.2.2. Les installations photovoltaïques : un équipement collectif autorisé sous conditions de compatibilité.....	75
4.2.3. L'analyse des effets sur l'économie agricole : l'étude préalable agricole.....	76
4.2.4. Modes de développement des installations photovoltaïque sur foncier agricole.....	78
4.3. Jurisprudence liée au photovoltaïque sur terrains agricoles.....	79
4.3.1. Décisions du conseil d'Etat.....	79
4.3.2. Les serres PV bénéficient d'une autorisation systématique.....	80
4.3.3. Les centrales au sol souvent interdites.....	81
4.4. Cadre de l'agrivoltaïsme.....	82
4.4.1. Le cadre de l'appel d'offre "Innovation" opéré par la Commission de Régulation de l'Energie (AO CRE).....	82
4.4.2. Documents locaux de cadrage de l'agrivoltaïsme ou du photovoltaïque sur terrains agricoles.....	83
4.5. Constats, enjeux et attentes de la filière photovoltaïque pour le développement d'installations photovoltaïques sur terrain agricole en France.....	86
4.5.1. Méthodologie des entretiens avec les développeurs.....	86
4.5.2. Types de systèmes développés et systèmes agricoles ciblés.....	86
4.5.2.1. Les centrales au sol avec activités d'élevage, un modèle dominant.....	86
4.5.2.2. Le développement des serres en ombrières comme outils agricoles, des réflexions à optimiser et en construction.....	87
4.5.3. Approche et modèles d'affaires du développeur et co-bénéfices avancés pour l'agriculture.....	88
4.5.3.1. Les Centrales au sol : produire de l'énergie compétitive avec des centrales au sol tout en se positionnant comme un aménageur du territoire.....	88

4.5.3.2. Les serres et ombrières : apporter un service visant à améliorer la valeur économique des produits agricoles.....	89
4.5.4. Synthèse des systèmes développés et de leurs modèles d'affaires	90
4.5.5. Suivis et retours expérimentaux.....	91
4.5.6. Attentes et difficultés soulevées par les développeurs	91
4.5.6.1. Les difficultés d'instruction : la crainte d'un précédent par les services de l'état lors de l'évaluation du permis de construire	91
4.5.6.2. Le manque d'ingénierie adaptée et des engagements attendus par rapport aux incertitudes sur la viabilité des modèles d'affaires	91
4.5.6.3. Des conditions réglementaires posant question	92
4.5.6.4. La question paradoxale de l'artificialisation des sols.....	92
4.5.6.5. Un manque de vision commune sur l'agrivoltaïsme.....	92
4.5.7. Autres démarches recensées.....	93
4.5.7.1. Un rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques sur « L'agriculture face au défi de la production d'énergie »	93
4.5.7.2. Des recommandations du SYNALAF.....	93
4.5.7.3. Sondage IFOP pour PHOTOSOL.....	94
4.5.7.4. Un guide des bonnes pratiques de l'agrivoltaïsme de la Plateforme Verte	95
4.5.7.5. A l'échelle européenne, un guide de Solar Power Europe	95
4.5.7.6. Autres initiatives.....	98

5. CADRES REGLEMENTAIRES DU DEVELOPPEMENT DU PHOTOVOLTAÏQUE SUR TERRES AGRICOLES A L'INTERNATIONAL ET ENSEIGNEMENTS PRELIMINAIRES98

5.1. Méthodologie	98
5.2. Japon.....	98
5.2.1. Dispositions réglementaires du photovoltaïque sur terres agricoles.....	98
5.2.1.1. Mesures générales de soutien du photovoltaïque, accessibles au photovoltaïque sur terres agricoles.....	98
5.2.1.2. Mesures spécifiques de soutien au photovoltaïque sur terres agricoles	99
5.2.1.2.1. Une conversion temporaire en terrains non agricoles.....	99
5.2.1.2.2. Depuis 2013, une autorisation des conversions temporaires des terrains EAA pour l'agrivoltaïsme.....	99
5.2.1.2.3. Allongement de la période de conversion temporaire pour la promotion de l'agrivoltaïsme sur certaines terres agricoles.....	99
5.2.1.2.4. Budget alloué.....	100
5.2.2. Situation actuelle des installations photovoltaïques sur terrains agricoles.....	100
5.2.2.1. Définition du « solar sharing »	100
5.2.2.2. Types et nombre d'installations déployées.....	100
5.2.2.3. Modèles d'affaires	101
5.3. Etats-Unis	102
5.3.1. Dispositions réglementaires du photovoltaïque sur terres agricoles.....	102
5.3.1.1. Mesures générales de soutien du photovoltaïque, accessibles au photovoltaïque sur terres agricoles.....	102
5.3.1.2. Mesures spécifiques de soutien au photovoltaïque sur terres agricoles	102
5.3.1.2.1. Le principal programme de soutien au photovoltaïque en agriculture: le Rural Energy for America Program (REAP)	102
5.3.1.2.2. Autres aides spécifiques aux agriculteurs.....	103
5.3.1.2.3. Au Massachussets, d'autres aides spécifiques au systèmes photovoltaïques en milieux agricoles	103

5.3.1.2.4. Des pénalités financières pour les terrains ayant souscrits à des servitudes de conservation	103
5.3.2. Situation actuelle des installations photovoltaïques sur terrains agricoles.....	105
5.3.2.1. Définition de l'agrivoltaïsme	105
5.3.2.2. Types et nombre d'installations déployées.....	105
5.3.2.3. Modèles d'affaires	106
5.4. Allemagne	107
5.4.1. Dispositions réglementaires du photovoltaïque sur terrain agricoles.....	107
5.4.1.1. Mesures générales de soutien du photovoltaïque, accessibles au photovoltaïque sur terres agricoles.....	107
5.4.1.1.1. Le photovoltaïque sur bâtiments.....	107
5.4.1.1.2. Le photovoltaïque au sol.....	107
5.4.1.1.3. Une absence d'aides dédiées à l'agrivoltaïsme.....	107
5.4.1.2. Mesures spécifiques de soutien au photovoltaïque sur terres agricoles	108
5.4.2. Situation actuelle des installations photovoltaïques sur terrains agricoles.....	109
5.4.2.1. Des définitions scientifiques de l'agrivoltaïsme	109
5.4.2.1.1. Le projet APV-Resola	109
5.4.2.1.2. Un guide de bonnes pratiques publié par le FRAUNHOFER.....	109
5.4.2.1.3. La publication d'une norme de définition de l'agrivoltaïsme	109
5.4.2.2. Peu de projets identifiables à ce jour	110
5.4.2.3. Modèles d'affaires	111
5.5. Italie	111
5.5.1. Dispositions réglementaires liées au photovoltaïque sur terrains agricoles.....	111
5.5.1.1. Mesures générales de soutien du photovoltaïque, accessibles au photovoltaïque sur terres agricoles.....	111
5.5.1.2. Mesures spécifiques de soutien au photovoltaïque sur terres agricoles	112
5.5.1.2.1. Des restrictions réglementaires pour les serres photovoltaïques : un cadre national, des modalités d'application régionales	112
5.5.1.2.2. Des conflits réglementaires en ce qui concerne les centrales photovoltaïques au sol sur terrains agricoles	113
5.5.2. Situation actuelle des installations photovoltaïques sur terrains agricoles.....	114
5.5.2.1. Types et nombres d'installations déployées	114
5.5.2.2. Modèles d'affaires	114
5.6. Chine.....	115
5.6.1. Dispositions réglementaires liées au photovoltaïque sur terrains agricoles.....	115
5.6.1.1. Mesures générales de soutien du photovoltaïque, accessibles au photovoltaïque sur terres agricoles.....	115
5.6.1.2. Mesures spécifiques de soutien au photovoltaïque sur terres agricoles	115
5.6.1.2.1. Une interdiction sur les terres agricoles de meilleure qualité.....	115
5.6.1.2.2. Une limite de puissance à 20 MW	115
5.6.1.2.3. Des mesures supplémentaires laissées à la responsabilité des régions.....	115
5.6.1.2.4. Un soutien régional largement répandu pour les serres photovoltaïques, plus rare pour le photovoltaïque au sol.....	116
5.6.2. Situation actuelle des installations photovoltaïques sur terrains agricoles.....	116
5.6.2.1. Type et nombre d'installations déployées	116
5.6.2.2. Les modèles d'affaires.....	116
5.7. Vietnam.....	117
5.7.1. Dispositions réglementaires du photovoltaïque sur terrains agricoles.....	117
5.7.1.1. Mesures générales de soutien du photovoltaïque, accessibles au photovoltaïque sur terres agricoles.....	117
5.7.1.2. Mesures spécifiques de soutien au photovoltaïque sur terres agricoles	117
5.7.1.2.1. Contraintes réglementaires sur terrains agricoles.....	117

5.7.1.2.2. Eligibilité aux aides.....	118
5.7.2. Situation actuelle du PV sur terrains agricoles au Vietnam.....	118
5.7.2.1. Définition du "dual-use" par le GreenID.....	118
5.7.2.2. Types et nombres d'installations déployées.....	118
5.8. Autres projets pilotes dans d'autres pays.....	119
5.8.1. Inde.....	119
5.8.2. Corée du Sud.....	120
5.8.3. Croatie.....	120
5.9. Synthèse des cadres réglementaires internationaux.....	120
5.10. Enseignements préliminaires de l'étude des cadres réglementaires et juridiques étrangers du photovoltaïque sur terrains agricoles.....	123
6. CONCLUSION.....	125
7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	126
7.1. Performance des systèmes photovoltaïques sur terrains agricoles.....	126
7.2. Cadres réglementaires et juridiques.....	129
7.2.1. France.....	129
7.2.2. Japon.....	130
7.2.3. Etats-Unis.....	130
7.2.4. Allemagne.....	131
7.2.5. Italie.....	133
7.2.6. Chine.....	134
7.2.7. Vietnam.....	134
7.2.8. Autres pays.....	135
LISTE DES FIGURES ET TABLEUX.....	135
SIGLES ET ACRONYMES.....	139

RÉSUMÉ

Le développement des énergies renouvelables au sein du secteur agricole est aujourd'hui une ambition partagée pour permettre d'atteindre les objectifs fixés par la loi de transition énergétique. Toutefois, ce développement dans le secteur agricole, y compris celui du photovoltaïque, ne peut se faire sans tenir compte de la nécessité de préserver les sols agricoles.

En réponse à ces enjeux, la notion « d'agrivoltaïsme », qui qualifie le couplage d'une production photovoltaïque secondaire à une production agricole principale avec une synergie de fonctionnement démontrable, a émergé au sein de la filière photovoltaïque française.

Au regard de l'intérêt croissant lié à ce nouveau secteur de marché pour le photovoltaïque, cette étude vise à caractériser les projets photovoltaïques sur terrain agricole et à définir précisément cette notion d'agrivoltaïsme. Elle s'est basée sur un état de l'art bibliographique, des entretiens avec des agriculteurs et développeurs et l'expertise d'un comité d'experts, constitué spécifiquement pour suivre ces travaux.

Cet état de l'art, première étape de ces travaux, a mis en évidence qu'il existe une grande variété d'installations photovoltaïques sur terrains agricoles, démontrant des niveaux de développement différents.

De plus, la bibliographie montre que ces systèmes ont globalement des effets neutres ou négatifs sur la production agricole, bien que ces résultats varient fortement en fonction des conditions pédoclimatiques locales, des espèces et variétés cultivées (dont les besoins en ensoleillement et en eau sont variables) et des caractéristiques des structures photovoltaïques associées (taux de recouvrement, orientation des panneaux, hauteur...). Cette constatation souligne le besoin d'un approfondissement des connaissances sur le sujet.

L'état de l'art réglementaire démontre également que rares sont les pays ayant une définition formelle de l'agrivoltaïsme. Des guides de bonnes pratiques ou des propositions de définition, tels que proposés par cette étude, sont d'ailleurs en train d'être publiés par différentes parties prenantes en Europe.

ABSTRACT

The development of renewable energies in the agricultural sector is now a shared ambition in order to achieve the objectives set by the Energy Transition Act. However, this development, including photovoltaics, cannot be done without taking into account the need to preserve agricultural land. In response to these challenges, the notion of "agrivoltaics", which qualifies the coupling of a secondary photovoltaic production to a main agricultural production with a demonstrable operating synergy, has emerged within the French photovoltaic sector.

In view of the growing interest linked to this new market sector for photovoltaics, this study aims to characterize photovoltaic projects on agricultural land and to define precisely this notion of agrivoltaics. It was based on a bibliographic review, interviews with farmers and photovoltaic developers, and the involvement of a committee of experts specifically set up to monitor this work.

This state of the art, first stage of this work, has shown that there is a wide variety of photovoltaic installations on agricultural land, demonstrating different levels of development. In addition, the bibliography shows that these systems have overall neutral or negative effects on agricultural production, although these results vary greatly depending on the local pedoclimatic conditions, the species and varieties cultivated (whose sunshine and water requirements are variable.) and the characteristics of the associated photovoltaic structures (coverage rate, orientation of the panels, height, etc.). This finding underscores the need for further knowledge on the subject.

The regulatory state of the art also shows that few countries have a formal definition of agrivoltaics. Various stakeholders in Europe are also publishing good practice guidelines or definition proposals, as proposed in this study.

CLES DE LECTURE DU DOCUMENT

Le développement des énergies renouvelables au sein du secteur agricole est aujourd'hui une ambition partagée pour permettre d'atteindre les objectifs fixés par la loi de transition énergétique. Toutefois, ce développement ne peut se faire sans tenir compte de la nécessité de préserver les sols agricoles.

En réponse, et afin de préserver la vocation agricole de ces parcelles, la notion « d'agrivoltaïsme » a émergé au sein de la filière photovoltaïque en France, notamment grâce à l'appel d'offre du gouvernement, opéré par la CRE, portant sur la "réalisation et l'exploitation d'installations de production d'électricité innovantes à partir de l'énergie solaire" dont le premier cahier des charges a été publié en 2017. Dans cet appel d'offre, les installations agrivoltaïques sont définies comme des installations photovoltaïques permettant de coupler une production photovoltaïque secondaire à une production agricole principale avec une synergie de fonctionnement démontrable.

Cette filière agrivoltaïque, bénéficiant ainsi d'un soutien financier de l'Etat, éveille l'intérêt des porteurs de projet et tend à prendre de l'ampleur. Au regard de la grande variété des solutions techniques présentes sur le marché, la justification de la synergie agricole de ces systèmes n'est pas toujours évidente ou démontrable et à priori, tous les systèmes ne répondent pas forcément aux prérequis de l'agrivoltaïsme.

Ainsi, au regard de l'intérêt croissant lié à ce nouveau secteur de marché pour le photovoltaïque, cette étude vise à caractériser les projets photovoltaïques sur terrain agricole et à définir précisément cette notion d'agrivoltaïsme. Elle s'est basée sur un état de l'art bibliographique, des entretiens avec des agriculteurs et développeurs et l'expertise d'un comité d'experts, constitué spécifiquement pour suivre ces travaux.

Ce rapport est le premier des quatre documents produits dans le cadre de l'étude, avec un recueil de retours d'expérience, un guide proposant un cadre de classification des projets photovoltaïques sur terrains agricoles, à partir d'une sélection de critères et de points d'attention, et un résumé exécutif de l'étude.

Cet état de l'art bibliographique a été rédigé en Mai 2020, puis mis à jour en Septembre 2021 avant sa publication.

Le schéma ci-dessous présente la place de ce document par rapport à l'étude générale.



Figure 1: Eléments constitutifs de cette étude

1. Introduction

1.1. Les enjeux de développement du photovoltaïque

La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV), promulguée le 17 août 2015, fixe des objectifs ambitieux en matière de développement des énergies renouvelables, notamment celui d'atteindre 40% de production d'électricité renouvelable en 2030.

Pour atteindre ces objectifs, le gouvernement définit une programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) déclinant, notamment, les objectifs et les moyens de déploiement pour chaque filière énergétique française. La PPE en cours, couvrant la période de 2016 à 2023, a été révisée pour fixer des objectifs à l'horizon 2028.

Concernant la filière photovoltaïque, la PPE publiée en 2020 prévoit un objectif de 35,1 à 44 GW de photovoltaïque pour 2028, dont 20,6 à 25 GW serait positionné au sol¹. Cela se traduirait par une puissance supplémentaire de centrales au sol de 16 à 21 GW par rapport à 2018. Si l'on adopte un ratio de 1 MW/ha, ce développement demanderait alors entre 16 000 ha et 21 000 ha de foncier pour les installer.

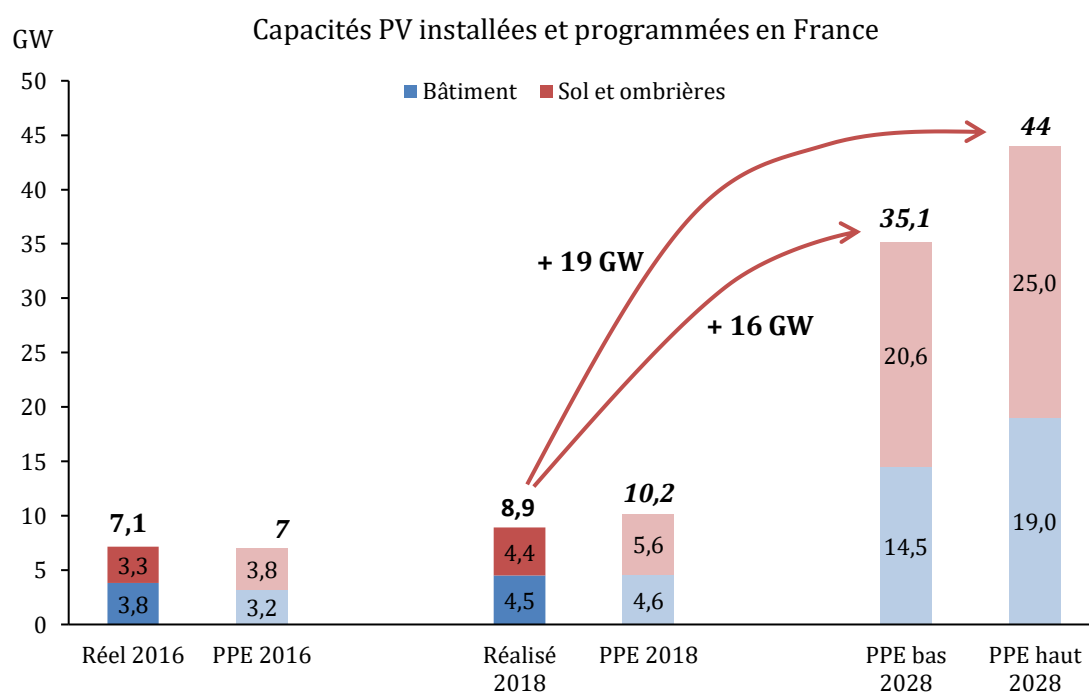


Figure 2 : Capacités PV installées et programmées en France dans le cadre de la PPE, source : SDES Tableau de bord : solaire photovoltaïque Quatrième trimestre 2019, Observatoire Energie Photovoltaïque 2019, PPE adoptée en avril 2020

Pour permettre concrètement le déploiement de l'énergie photovoltaïque en France, l'Etat a mis en place un certain nombre de dispositifs de soutien : sous la forme de tarifs d'achat, associés à une obligation d'achat par un acheteur obligé (EDF, une Entreprise Locale de Distribution ou un organisme agréé) pour les installations de faible puissance électrique, ou via des appels d'offres pour les centrales au sol et les grandes toitures.

¹ PPE 2020

Fin 2020, environ 11 GW² de systèmes photovoltaïques sont installés et raccordés en France, permettant la production de 12,9 TWh, soit 2,9% de la consommation électrique française sur l'année 2020. Les régions Nouvelle-Aquitaine, Occitanie, PACA et Auvergne-Rhône-Alpes disposent des capacités installées les plus élevées, représentant près de 70% de la puissance totale raccordée en France, bien qu'un nombre croissant de projets ait été constaté dans les régions Nord et Grand-Est.

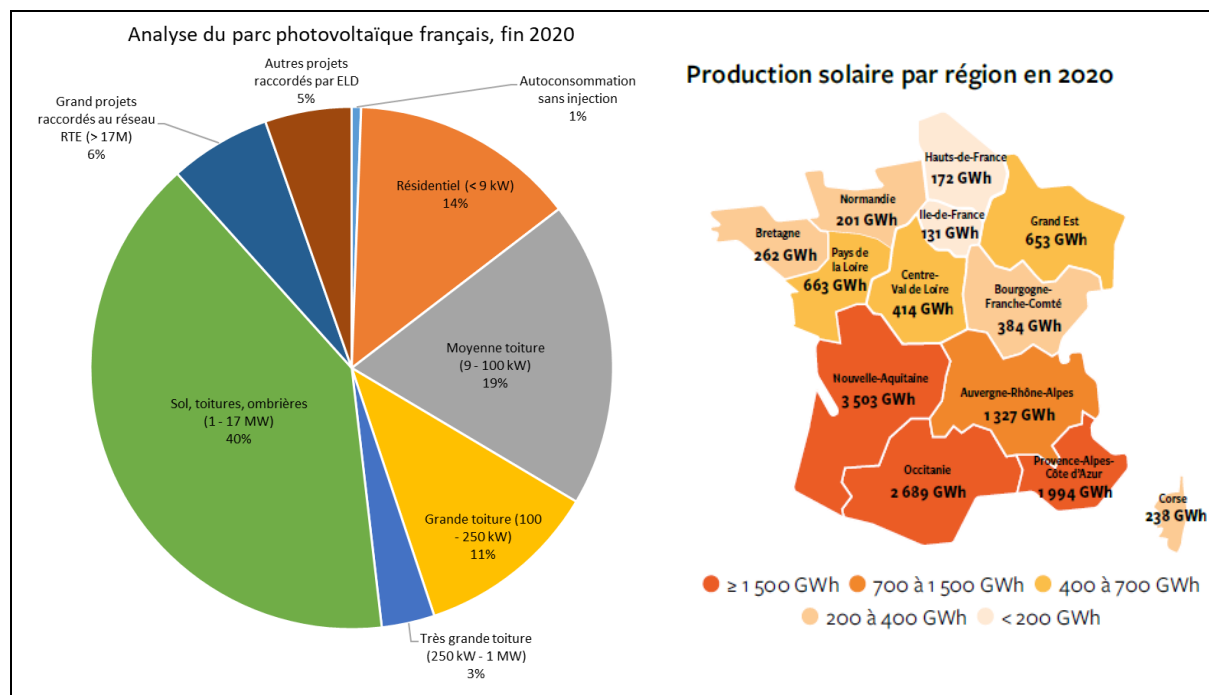


Figure 3: Puissance photovoltaïque installée par région et par type de système
 Source : RTE 2020, Observatoire Energie Photovoltaïque 2020

Dans ce contexte de fort développement du photovoltaïque, les développeurs recherchent des terrains (et toitures) pour déployer des installations photovoltaïques. Pour les centrales au sol, l'Etat a privilégié le développement de celle-ci sur des terrains dit dégradés. Au fil des années, la concurrence autour de ces terrains dégradés pousse les développeurs à se tourner vers d'autres sites, comme les terrains agricoles.

² Ministère de la Transition Ecologique - Commissariat général au développement durable - STAT INFO - Tableau de bord : solaire photovoltaïque - Quatrième trimestre 2020 – n°343 – Février 2021

1.2. Développement du photovoltaïque en secteur agricole: risques et opportunités pour les activités et filières agricoles

1.2.1. Adaptation des systèmes photovoltaïques aux spécificités du secteur agricole

Les installations photovoltaïques majoritairement développées en France sont des centrales au sol et des toitures photovoltaïques. Sur les parkings, des modules photovoltaïques peuvent également être installés sur des structures surélevées, permettant de protéger les voitures du soleil et prenant ainsi le nom « d'ombrières ». Ces 3 types « classiques » d'installations photovoltaïques sont représentées dans le tableau ci-dessous.







Type d'installation photovoltaïque	Centrales au sol	PV sur toitures	Ombrières
	 https://www.lechodusolaire.fr/ https://cutt.ly/Yynlqot	 https://www.notre-planete.info https://cutt.ly/qynljfy	 https://www.filiere-3e.fr/ https://cutt.ly/AynlxDY

Tableau 1: Types d'installation photovoltaïque généralement développés en France

Pour pouvoir s'installer en terrain agricole, ces trois types d'installations ont été adaptés aux contraintes posées par l'activité agricole :

- Les centrales au sol sont globalement similaires à celles développées sur d'autres terrains, mais les structures peuvent être surélevées ou les rangées de modules peuvent être écartées pour laisser de la place à la production agricole.
- Les ombrières montées au-dessus de productions végétales ont été adaptées (en termes de surface de modules, d'orientations, de hauteur) pour partager l'ensoleillement avec les cultures sous-jacentes, voire permettre la circulation d'engins agricoles.
- Les modules sur bâtiments agricoles ne sont pas ou peu différents de ceux installés sur d'autres bâtiments sauf pour les serres agricoles. Leur structure particulière et le besoin d'ensoleillement des cultures sous-jacentes ont imposé certaines adaptations par rapport aux installations sur bâti classique. Par exemple, des modules souples ont été conçus pour des usages spécifiques, et notamment pour l'installation sur des serres agricoles notamment des serres tunnels.
- Enfin, des installations spécifiques aux terrains agricoles ont été développées : il s'agit notamment de modules verticaux bifaciaux qui minimisent l'emprise au sol au profit des productions végétales et des passages d'engins. Il existe également des modules photovoltaïques montés sur des équipements agricoles (rampe d'irrigation, pompes, ...).

Type d'installation photovoltaïque	Description	Photographie
Centrales au sol	Hauteur du point bas : entre 0,8 et 1,5m Densité de puissance : 1MWc/ha	 https://newstrrotteur.fr/ https://cutt.ly/8ynlIEV
Ombrières PV dynamiques	Hauteur : près de 4m Densité de puissance : Entre 0,6 et 0,8 MWc/ha	 https://www.ombrea.fr/  www.sunr.fr  https://solaire-info.fr https://cutt.ly/Oynzo8y
Ombrières PV fixes (parfois appelés serres ouvertes)	Hauteur : entre 2 et 4m Densité de puissance : près de 1MWc/ha	 http://www.lafranceagricole.fr https://cutt.ly/tynzgUF https://eklor.pro/ https://cutt.ly/jynzCk 
PV sur bâti		 www.picbleu.fr https://cutt.ly/mynzxHA www.fnsea.fr  https://cutt.ly/qynzElw
Serres PV	Hauteur : entre 3 et 5,5m Densité de puissance : entre 0,6 et 1MWc/ha	 https://www.akuoenergy.com/fr/  https://reden.solar/  www.wiseed.com https://cutt.ly/rvynzLI5  http://www.industrie-mag.com/article17573.html



Type d'installation photovoltaïque	Description	Photographie
Modules PV souples sur serres	Hauteur : NA Densité de puissance : NA	 http://www.photovoltaique.guidenr.fr/ https://cutt.ly/Fynz5ge
Centrales à modules bifaciaux	Hauteur : entre 0,5 et 2,5m environ Densité de puissance : entre 0,3 et 1MWc/ha	 www.lechodusolaire.fr/ https://cutt.ly/EynzV7J

Tableau 2: Types d'installation photovoltaïque développés dans le secteur agricole

1.2.2. Le risque d'artificialisation des sols agricoles

L'artificialisation des sols agricoles correspond à la transformation de surfaces agricoles en des espaces bâtis, revêtus, imperméabilisés ou stabilisés (routes, voies ferrées, parkings, chemins, chantiers, terrains vagues ...). Selon les méthodes de mesures utilisées, les sols artificialisés représentent entre 5,5 et 9,3% de la surface française en 2012-2016³. Deux tiers de ces sols sont imperméabilisés, c'est-à-dire couverts par du bâti ou des surfaces imperméables, bitumées par exemple. Le rythme d'artificialisation a baissé ces dernières années pour s'établir à près de 50 000 ha/an. L'artificialisation des sols agricoles représentent 70% des surfaces artificialisées.⁴

Cette artificialisation pose de nombreux problèmes potentiels (à des degrés divers selon le type de changement d'utilisation des sols effectué) : environnementaux d'une part (ex : pertes de biodiversité, émissions de carbone, dégradation des sols ...) et sociaux-économiques d'autre part (diminution de la production agricole, déstabilisation des exploitations et des filières, aggravation des épisodes d'inondation...).

Pour cela, la France a fixé l'objectif du zéro artificialisation nette (ZAN : surfaces artificialisées – surfaces réhabilitées, renaturées ou désimperméabilisées = 0) pour 2050 dans le plan biodiversité de 2018, ainsi que celui de diviser de moitié le rythme d'artificialisation d'ici 2030. Il implique donc une forte limitation de l'artificialisation, ainsi qu'une réhabilitation de sols artificialisés.

L'installation de modules photovoltaïques sur terres agricoles pourrait être considérée comme de l'artificialisation, ceci dépendant de l'interprétation de la définition de l'artificialisation et des méthodes de mesure (utilisation d'images satellites - données Corine Land Cover – ou utilisation d'enquêtes terrain - enquête TERUTI – LUCAS).

Suite à l'adoption le 28 juin 2021 de plusieurs amendements, une disposition du projet de loi climat stipule qu'« un espace naturel ou agricole occupé par une installation de production d'énergie photovoltaïque n'est pas comptabilisé dans la consommation d'espaces naturels, agricoles et

³<https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-rapport-2019-artificialisation-juillet.pdf>

⁴Rapport de l'Expertise Scientifique Collective ; INRA, IFSTTAR ; Sols artificialisés et processus d'artificialisation : déterminants, impacts, leviers d'actions ; décembre 2017 ;

forestiers. ». Pour autant, le texte indique que les installations photovoltaïques ne doivent pas affecter durablement les fonctions écologiques du sol. Suite à l'adoption d'un sous-amendement, il précise aussi que ces installations ne doivent pas être incompatibles avec l'exercice d'une activité agricole ou pastorale. Les modalités de mise en œuvre de ces dispositions devront être précisées par décret en Conseil d'État.

Quand bien même l'installation d'un parc photovoltaïque pourrait être considérée, dans certains cas, comme une artificialisation du sol, ses effets environnementaux et socioéconomiques notamment sur l'activité agricole, sont bien différents d'autres aménagements imperméabilisant les sols. Ces effets dépendent des types d'installations et font l'objet de débats.

1.2.3. L'opportunité économique du photovoltaïque pour les agriculteurs

En France, comme dans d'autres pays européens, le monde agricole connaît des difficultés structurelles et économiques. Entre la baisse des prix des produits agricoles (en lien avec les marchés internationaux) et la hausse des coûts de production (prix de l'énergie, de la main d'œuvre, mises aux normes environnementales et sociales, gestion des aléas climatiques notamment), les agriculteurs sont en quête de solutions de diversification et de levier de pérennisation de leurs activités. La production d'électricité photovoltaïque peut ainsi représenter un complément de revenu significatif.

En effet, les revenus liés à la production d'électricité photovoltaïque, dont les retombées économiques pour les agriculteurs prennent différentes formes selon les modèles d'affaires choisis, peuvent permettre d'atteindre un revenu à l'hectare plus important que les revenus agricoles eux-mêmes. De plus, ces revenus sont sécurisés car ils font l'objet d'une contractualisation sur plusieurs dizaines d'années, assurant ainsi des revenus constants pour les agriculteurs. Parfois, les installations photovoltaïques peuvent également apporter des bénéfices aux productions agricoles, de par la modification des paramètres microclimatiques, la protection physique des cultures contre les intempéries ou l'approvisionnement en énergie (chauffage et éclairage). Compte tenu de l'importance du revenu généré par les modules photovoltaïques, le risque est de voir l'activité agricole se dégrader, l'agriculteur n'en ayant plus vraiment besoin pour se verser un revenu.

1.3. Un cadre réglementaire et fiscal français du photovoltaïque sur terrains agricoles complexe et sujet à interprétation

Le cadre réglementaire français du photovoltaïque sur terres agricoles est détaillé dans le présent rapport (cf. §4). De manière générale, il contraint fortement le développement du photovoltaïque sur terres agricoles en imposant, au minimum, une compatibilité de l'installation avec le maintien de l'activité agricole. L'autorisation de son développement passe par la voie du permis de construire (délivré par le préfet d'EPCI ou de département) et dépend hautement de la classification des terrains au titre du Plan Local d'Urbanisme (PLU). Toutefois, de récentes évolutions ont permis de démontrer la compatibilité de certains projets avec le maintien d'une activité agricole. Ainsi, des installations photovoltaïques sur terrains agricoles sont possibles mais la définition de cette compatibilité n'est pas clairement établie.

Le cadre de soutien financier (cf. §4.1) du développement du photovoltaïque sur terres agricoles est régi par celui du photovoltaïque et en particulier par les Appels d'Offre nationaux opérés par la Commission de Régulation de l'Energie (notés AO CRE dans ce rapport) qui concernent les grandes installations ou les installations innovantes. Si le cadre général des AO CRE exclut les terrains agricoles, des projets agrivoltaïques sur terres agricoles (et considérées comme tel au titre du PLU) sont autorisés au sein d'une « famille » de l'AO CRE relatif aux installations innovantes⁵.

L'agrivoltaïsme a d'abord été défini comme « une combinaison de modules photovoltaïques et de cultures alimentaires sur un même terrain » par Dupraz et al. (2011). Dans cet AO CRE, ces installations agrivoltaïques doivent permettre le « couplage d'une production photovoltaïque secondaire à une

⁵ Cahier des charges de l'appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'Installations de production d'électricité innovantes à partir de l'énergie solaire, sans dispositifs de stockage

production agricole principale en permettant une synergie de fonctionnement démontrable ». Cette définition, qui introduit les notions de synergie de fonctionnement et de production primaire et secondaire, fait l'objet de débats et laisse une certaine marge d'interprétation, sans consensus réel au sein de la filière. En ce sens, l'éligibilité et l'appartenance à ce type de système innovant, spécifiquement soutenu, est statué par l'ADEME sur la base d'un dossier technique dans le cadre de l'instruction de cet AO.

1.4. Une nécessité d'aboutir à un cadre clair et partagé issu d'une caractérisation objective du photovoltaïque sur terrains agricoles

Du fait des difficultés évoquées précédemment et des nombreux enjeux autour du développement du photovoltaïque sur terres agricoles, la présente étude vise à analyser tous types de systèmes photovoltaïques sur terrains agricoles pour définir les contours de ces synergies agricoles et aboutir à une définition potentiellement plus concrète de l'agrivoltaïsme.

Cette étude vise à :

- Réaliser un état de l'art français et international des systèmes photovoltaïques utilisés dans le secteur agricole,
- Mener une collecte des retours d'expériences français (métropole et ZNI) permettant d'identifier les systèmes les plus pertinents au regard des enjeux pour l'agrivoltaïsme et les bonnes pratiques déjà mises en œuvre sur le terrain,
- Définir précisément la notion d'agrivoltaïsme,
- Produire un guide de recommandations à destination des décideurs et des pouvoirs publics (du niveau national au niveau local) permettant d'accompagner et de faciliter la réalisation de projets d'agrivoltaïsme tout en identifiant les moyens de soutenir cette filière.

Les terrains agricoles concernés par l'étude sont : le foncier agricole incluant les bâtiments agricoles comme les terres arables (englobant les cultures annuelles comme les céréales et les grandes cultures mais aussi les prés de fauche, les pâturages temporaires, les cultures maraîchères, et les jachères temporaires), les cultures permanentes et les pâturages permanents. Néanmoins, ces terrains peuvent être considérés comme agricoles ou non au regard de la réglementation, et notamment des Plans Locaux d'Urbanisme (PLU).

La présente note constitue l'état de l'art du photovoltaïque sur terrains agricoles, premier maillon de l'étude. Il vise à apporter des éléments objectifs qui nourriront la réflexion autour de la définition de l'agrivoltaïsme et l'accompagnement de son développement.

La note décrit :

- Un panorama des systèmes photovoltaïques agricoles dans le monde et l'identification de systèmes d'intérêt pour une caractérisation approfondie ;
- La performance des systèmes photovoltaïques sur terrains agricoles d'un point de vue agronomique, énergétique, environnemental ;
- Les constats, enjeux et attentes de la filière photovoltaïque pour le développement du photovoltaïque sur terrain agricole en France
- Les cadres réglementaires et juridiques en France et à l'étranger du photovoltaïque sur terrains agricoles et les définitions existantes de l'agrivoltaïsme.

2. Panorama des systèmes photovoltaïques agricoles dans le monde et identification des systèmes retenus pour une caractérisation approfondie

2.1. Méthodologie

2.1.1. Principes

Un premier travail d'identification des systèmes existants a été visé : les différentes typologies de procédés photovoltaïques utilisés dans le secteur agricole ont été répertoriés, en distinguant les systèmes en exploitation, en expérimentation ou en développement.

Un deuxième travail a été réalisé afin d'identifier les systèmes d'intérêt pour une caractérisation approfondie, c'est-à-dire, les systèmes qu'il était possible d'étudier en termes de caractéristiques technico-économiques. Ainsi, les typologies de systèmes encore en cours de R&D, ou les systèmes dont l'expérimentation ne fait que commencer, ne permettant pas l'obtention de caractéristiques agronomiques ou l'étude de modèles d'affaires ont été écartés de l'étude.

Pour ce faire, plusieurs canaux d'information ont été employés : l'étude de la littérature du photovoltaïque sur terrains agricoles, le suivi d'initiatives sur l'agrivoltaïsme, une enquête auprès de développeurs de projets photovoltaïques et le recensement des installations photovoltaïques sur terrains agricoles.

2.1.2. Etude bibliographique

Concernant la littérature, plusieurs types de documents ont été explorés : des articles scientifiques principalement mais également des rapports d'étude, des plaquettes commerciales et des articles de journaux.

Une recherche spécifique liée à l'agrivoltaïsme a d'abord été menée avec les mots clés suivants : « Agrivoltaic* », « Agrophotovoltaic* », « Agrovoltaic* », « Solar integrated farming », « Solar sharing », pour ce qui est de la littérature étrangère et : « agrivoltaïsme », « agrivoltaïque », « agriénergie », « agrisolaire* », « agriphotovoltaïque* » pour la littérature française.

Ensuite, une recherche élargie a été menée plus largement sur le photovoltaïque sur terres agricoles. Les mots clés suivant ont été utilisés « photovoltaic* » OR « solar* » AND « crop* » OR « plantation* » OR « farm* » OR « greenhouse* » pour la littérature étrangère, et « photovoltaï* » OU « panneau* solaire* » OU « module* solaire* » ET « terre* agricole* » OU « terrain* agricole* ».

Ces recherches ont été menées sur Google et Google Scholar. Les publications les plus récentes et les plus pertinentes (en particulier celles traitant directement de l'agrivoltaïsme) ont été utilisées comme source de références supplémentaires : leur bibliographie a été étudiée en vue d'identifier des nouvelles publications d'intérêt.

Les publications identifiées ont été analysées dans un premier temps en caractérisant le type d'installation photovoltaïque et le type de production agricole concernées afin d'identifier les systèmes photovoltaïques agricoles.

Au total, 106 publications ont ainsi été recensées pendant la recherche bibliographique, dont 75 considérées comme d'intérêt et intégrées dans cet état de l'art.

La plupart des documents étudiés dans l'état de l'art sont des articles scientifiques (67%) et des documents techniques (13%). Il est à noter qu'il s'agit de ressources récentes : 56% ont été publiées après 2015, 35% entre 2010 et 2015, tandis que seulement 7% des publications sont antérieures à 2010.

Il convient donc d'anticiper que l'état des connaissances va continuer d'évoluer dans les années à venir.

Ces publications proviennent essentiellement de France et d'Europe (63%), des Etats-Unis (9%) et des pays d'Asie (21%). Sur le plan technique, les systèmes photovoltaïques les plus étudiés sont les ombrières fixes (30% des publications utilisées), les serres (26%) et les centrales au sol (22%). De plus, les impacts sur les plantes les plus étudiés sont ceux sur le maraîchage (32% des publications de l'état de l'art), les grandes cultures (13%) et les prairies (10%).

La plupart des études (95%) concernent les impacts du photovoltaïque sur les plantes (rendements, qualité et autres). Une partie d'entre elles (21%) s'intéresse également aux impacts économiques des couplages, tandis qu'une minorité (16%) étudient les impacts du couplage sur la production d'énergie. 16% des études abordent la question de l'efficacité de l'utilisation des sols par rapport à cette double production, grâce à l'indicateur de « Land Equivalent Ratio » (LER) (cf. §3.3.3.).

2.1.3. Suivi des initiatives sur l'agrivoltaïsme

De nombreux échanges et discussions sur le sujet de l'agrivoltaïsme ont eu lieu dans le cadre de conférences et séminaires et ont été utilisés pour nourrir cet état de l'art sur le développement du photovoltaïque sur terrains agricoles. C'est notamment le cas des événements ci-dessous :

- Conférence « Solaire, transition agricole et énergétique : les conditions de la réussite » du 5 novembre 2019 à Bordeaux. Elle a été organisée par l'Institut National de l'Energie Solaire (INES) avec la région Nouvelle-Aquitaine et l'ITEN CEA tech en partenariat avec Green Lighthouse, Ademe, Cluster Energie Stockage, Crédit Agricole
- Les séminaires « Agriculture et solaire » organisés par la Plateforme Verte les 5 novembre 2019 et 7 février 2020
- Des échanges avec les territoires en cours d'appréhension de la démarche agrivoltaïsme et de définition des orientations stratégiques pour ces secteurs concernés (Région Nouvelle-Aquitaine, collectivités territoriales pilotes).

2.1.4. Enquête auprès des développeurs photovoltaïques

Dans le but d'obtenir une vision de la filière photovoltaïque sur les enjeux du développement photovoltaïque sur les terrains agricoles, et d'identifier efficacement des données d'intérêt, une dizaine de développeurs a été sélectionnée au sein d'un panel varié (taille de l'entreprise, proximité avec le monde agricole...) puis interviewée.

Les quinze développeurs interrogés (voir tableau ci-dessous) ont été identifiés grâce au recensement d'articles de presse sur la thématique de l'agrivoltaïsme et en fonction de leurs dynamiques particulières ciblant l'agriculture ou de leur participation à des initiatives sur l'agrivoltaïsme. Il ne s'agit en aucun cas d'un recensement exhaustif ou d'un échantillonnage représentatif du poids de l'agrivoltaïsme au sein de la filière.

AGRITERRA/AKUO	GREEN LIGHTHOUSE	REDEN SOLAR
EDF RENOUVELABLES	GREEN YELLOW	RES
ENGIE GREEN	NEOEN	SUN'R
ENOE	OMBREA	VALOREM
GENERALE DU SOLAIRE	PHOTOSOL	VOLTALIA

Des précisions sur ces entretiens sont données dans le paragraphe 4.5

2.1.5. Identification des systèmes photovoltaïques agricoles

Pour ce travail d'identification des systèmes existants, un tableau des couples « type d'installation photovoltaïque » x « type de production agricole » a été construit par croisement des différents types d'installations photovoltaïques et de production agricole, en excluant certains croisements impossibles (ex : serres photovoltaïques sur grandes cultures). L'exploration des différents canaux a permis de sélectionner parmi cette première liste, les systèmes existants actuellement ou prochainement, c'est-à-

dire les systèmes « en exploitation » (production commerciale, agricole et électrique), « en expérimentation » (production expérimentale avec suivi spécifique), ou « en projet » (installation non encore en production).

2.1.6. Etude des systèmes photovoltaïques agricoles

Une partie des systèmes identifiés a ensuite été étudiée de manière plus détaillée en s'intéressant particulièrement aux modèles d'affaires associés. Quelques systèmes en projet ont également été sélectionnés car présentant des intérêts particuliers : c'est, par exemple, le cas des centrales bifaciales verticales dont l'emprise au sol est particulièrement faible, ou le cas des centrales au sol avec maraîchage où de nombreuses cultures différentes sont testées.

L'étude de ces systèmes s'est effectuée dans le cadre de fiches techniques détaillées, débutées lors de l'étude bibliographique, puis complétées lors de la phase d'enquête des installations. Elles sont présentées dans un autre livrable de cette étude dénommé « Recueil de retours d'expériences et fiches techniques récapitulatives ».

Le format des fiches a été défini en amont de la première réunion du comité technique. Il a été discuté à cette occasion et révisé, suite aux commentaires des experts. Selon les systèmes, et en particulier selon leur statut (en exploitation ou en projet), le format des fiches a été adapté.

Les caractéristiques des systèmes, étudiés dans les fiches, sont présentés ci-dessous :

- Description du couple photovoltaïque – production agricole
 - o Modèle technico-économique
 - Caractéristiques techniques et impact sur le foncier agricole
 - Acteurs impliqués et nature des implications
 - o Modèle technico-économique lié à la production agricole
- Impact du système agricole sur la production photovoltaïque
- Impact du photovoltaïque sur le système agricole et bonnes pratiques identifiées
 - o Etats initiaux et parcours de production
 - o Incidences à l'échelle de la parcelle
 - o Incidences à l'échelle de l'exploitation agricole
 - o Incidences à l'échelle des territoires
- Surfaces agricoles potentiellement concernées par le système
- Bilan du couple photovoltaïque – production agricole
 - o Atouts et faiblesses
 - o Opportunités et pratiques d'intérêt
 - o Menaces et pratiques à limiter

2.2. Systèmes photovoltaïques agricoles identifiés

Au total, 23 systèmes ont été identifiés dont 10 en expérimentation (5 en France et 5 à l'étranger), 15 installés et en fonctionnement en France et 3 en projet en France. Dans ces systèmes, 4 sont liés à des centrales au sol, 11 à des ombrières fixes ou mobiles, 3 à des serres, 3 à des toitures, 1 à des modules verticaux bifaciaux et 1 à des modules sur matériel agricole (rampe d'irrigation, par exemple). Les systèmes avec ombrières sont couplés avec les différentes productions végétales (hormis les zones de prairie). Il en est de même pour les centrales au sol (hormis l'arboriculture). Les serres ne sont couplées qu'avec l'arboriculture, le maraîchage et l'horticulture. Seules les installations de centrale au sol et sur bâtiment sont couplées avec des productions animales (du pâturage uniquement pour les centrales au sol).

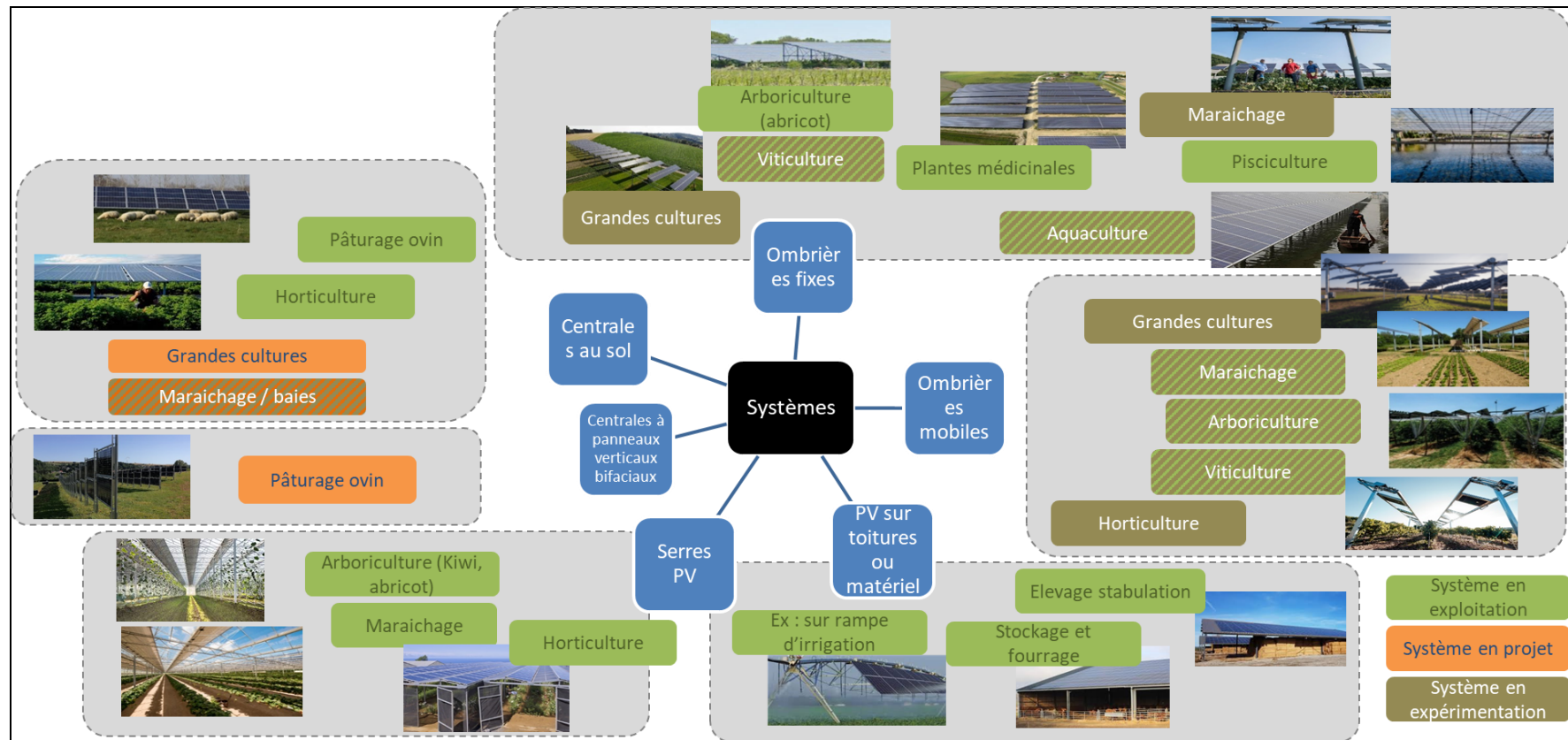




Figure 4 : Diversité des systèmes photovoltaïques agricoles

2.2.1. Systèmes avec centrales au sol

Caractérisation du système PV agricole			Maturité du système			Photographies
Type d'installation	Type de production	Synergie PV / production agricole	Expérimenté, installé ou en projet	Installations identifiées	Année de mise en service	
Centrale au sol	Pâturage (ex : ovin) voire apiculture	Ombrage animaux, microclimat tempéré plantes	Installé en France	Des dizaines d'installations existantes (38 installations recensées) par au moins 5 développeurs différents partout en France.	Depuis 2009	 https://www.marcoussis.fr/-La-ferme-solaire-
	Maraîchage/baies	Microclimat tempéré et protections plantes	Projets en France et expérimenté à l'étranger	France : centaines d'hectares de projets en phase de développement avec diverses cultures par au moins 5 développeurs USA : Dinesh Harshavardhan et Joshua M. Pearce. (2016), expé INRA Montpellier	Depuis 2013	NA
	Grandes cultures	Microclimat tempéré et protections plantes	Projets en France	Exemple : Projet de céréales, CIVE et cultures dérobées sous modules	NA	NA
	Horticulture (ex géranium)	Microclimat tempéré et protections plantes	Installé en France	Exemple sur géranium Akuo - Ravines des Cabris - La Réunion (1 installation recensée)	2012	 https://www.akuoenergy.com/fr/chemin-canal


Caractérisation du système PV agricole			Maturité du système			Photographies
Type d'installation	Type de production	Synergie PV / production agricole	Expérimenté, installé ou en projet	Installations identifiées	Année de mise en service	
Centrale à modules bifaciaux verticaux « Est-Ouest »	Pâturage (ou maraîchage ?)	Ombrage animaux temporaire et protection contre le vent, microclimat tempéré plantes	Projets en France Installé à l'étranger ?	Projet de Total Quadran and Next2Sun Exemple en Allemagne ?	NA ?	 www.lechodusolaire.fr https://cutt.ly/xynxWyD

Tableau 3: Types de couplages entre centrales photovoltaïques au sol et production agricole dans le monde




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

Une installation de centrale au sol en horticulture est en exploitation et des projets en maraîchage se développent. De la même façon, ces productions agricoles imposent a priori peu d'adaptation à l'installation photovoltaïque : les travaux culturaux pouvant être faits à la main. Les retours d'expériences sur ces systèmes sont cependant faibles et seraient nécessaires (notamment sur l'écartement des modules, leur hauteur et leur densité).

Des projets en grandes cultures se développent également mais l'écartement des modules devra probablement être augmenté par rapport à une centrale au sol classique.

Les centrales à modules bifaciaux verticaux sont, quant à elles, de nouvelles structures. Elles ont été développées spécifiquement pour répondre aux enjeux agricoles liés à l'emprise des modules au sol. Ce système, couplé à du pâturage, n'a à priori pas encore été testé.

2.2.2. Systèmes avec ombrières fixes

Caractérisation du système PV agricole			Maturité du système			Photographies
Type d'installation	Type de production	Synergie PV / production agricole	Expérimenté, installé ou en projet	Installation identifiée	Année de mise en service	
Ombrières fixes	Grandes cultures (exemple blé, pommes de terre)	Ombrage et protections plantes	Expérimenté à l'étranger	Allemagne : expérimentation sur blé d'hiver (Fraunhofer ISE, Allemagne) - APV-RESOLA-Project	Depuis 2016	 https://solaire-info.fr https://cutt.ly/Qynzo8y
	Vignoble	Ombrage et protections plantes	Expérimenté à l'étranger Installées en France	- Inde (Malu et al. 2017) - Exemple Akuo - Château Bellegarde, Gard (1 installation recensée)	2017 ? -	
	Maraîchage	Ombrage et protections plantes	Expérimenté à l'étranger	Japon : expérimentation sur près de 25 fruits et légumes (APC Group, 2018) USA : expérimentation de l'University of Arizona, Tucson sur piments et tomates cerises (Barron-Gafford et al., 2019)	- 2018 - 2017	
Ombrières fixes avec panneaux tubulaires	Tous types de systèmes	Ombrage et protection des plantes Structures plus légères que des ombrières classiques	Commercialisé à l'étranger	Allemagne	Non connu	 https://tubesolar.de/en/the-future-of-photovoltaics/
Ombrières fixes (ou serre ouverte)	Arboriculture (exemple abricot)	Ombrage et protections plantes	Installé en France	Exemple sur fruit de la passion Akuo - Ravines des Cabris - La Réunion et sur abricots Akuo - Château Bellegarde, Gard (1 installation recensée)	Non connu	 /www.akuoenergy.com https://cutt.ly/Syncyye




Caractérisation du système PV agricole			Maturité du système			Photographies
Type d'installation	Type de production	Synergie PV / production agricole	Expérimenté, installé ou en projet	Installation identifiée	Année de mise en service	
	Plantes médicinales et aromatiques (exemple Ginseng)	Ombrage et protections plantes	Installé en France	Exemple sur Ginseng de Solveo Energie- Seysse (3 installations recensées)	Non connu	 http://www.mateos-elec.fr/realisations/
Protection photovoltaïque (ou ombrières fixes ou serre ouverte)	Pisciculture (exemple saumon, truite)	Ombrages animaux	Installé en France	Exemple REDEN Solar et Akuo - "les cèdres" à Etang-salé (4 installations recensées)	Non connu	 https://www.akuoenergy.com/fr/les-cedres
Centrale flottante aquacole	Aquaculture (exemple moules)	Ombrage animaux, microclimat tempéré	Installé en Asie En projet en France	Exemple de mytiliculture pour le projet du bassin de Thau	NA	 http://nttw.co/japon-succes-pme-illoise-dans-solaire-flottant/





Tableau 4: Types de couplages entre ombrières photovoltaïques fixes et production agricole dans le monde

Les ombrières fixes sont des installations en hauteur permettant un couplage avec toutes les productions agricoles requérant des travaux cultureux, mécanisés ou non. Des systèmes couplant ombrières fixes et cultures existent en exploitation ou en expérimentation, sur tous les grands types de production agricole.

Ces types d'installations agricoles sont relativement variés, certaines se rapprochent des structures de type serres photovoltaïques sans parois verticales et peuvent d'ailleurs être appelées serres ouvertes, ou protection photovoltaïque (en pisciculture).

Sur les productions aquacoles, des installations se rapprochent de la structure des centrales au sol et sont appelées « centrale flottante aquacole ».

2.2.3. Systèmes avec ombrières mobiles

Caractérisation du système PV agricole			Maturité du système			Photographies
Type d'installation	Type de production	Synergie PV / production agricole	Expérimentée, installée ou en projet	Installation identifiée	Année de mise en service	
Ombrières mobiles (surélevées)	Grandes cultures (exemple blé dur)	Ombrage et protections plantes	Expérimenté en France et à l'étranger	France : Expérimentation sur blé dur INRA France : Expérimentation INRAE/EDF sur luzerne Italie : Expérimentation sur blé et maïs de REM TEC avec l'université de Piacenza - et expérimentation (Amaducci et al., 2018)	- Depuis 2009 - Depuis 2019 - 2018?	 Edouard S. et al. 2020
	Vignoble	Ombrage et protections plantes	Expérimenté et installé en France	- Expérimentation Sun'R - Installations OMBREA	- Depuis 2009 - 2019	 www.ombrea.fr
	Arboriculture	Ombrage et protections plantes	Expérimenté et installé en France	- Expérimentation Sun'R - Installations OMBREA	- Depuis 2009 - 2019	 www.sunr.fr
	Maraîchage	Ombrage et protections plantes	Expérimenté et installé en France	Exemple OMBREA	2019	 www.ombrea.fr


Caractérisation du système PV agricole			Maturité du système			Photographies
Type d'installation	Type de production	Synergie PV / production agricole	Expérimentée, installée ou en projet	Installation identifiée	Année de mise en service	
	Horticulture	Ombre et protections plantes	Expérimenté en France	Expérimentation OMBREA - Expérimentation d'ASTREDHOR & CA Var	Non connu	 <small>www.ombrea.fr</small>

Tableau 5: Types de couplages entre ombrières photovoltaïques mobiles et production agricole dans le monde

Les ombrières mobiles sont des installations en hauteur comme les ombrières fixes. Les modules photovoltaïques peuvent cependant être orientés (généralement de manière automatisée), soit pour gérer l'ensoleillement et l'ombrage des cultures sous-jacentes, soit pour protéger les cultures des intempéries.

Comme les ombrières fixes, elles ont été développées sur des cultures très variées.

La technicité de leur utilisation et le besoin de retours d'expérience pour déterminer un pilotage efficient expliquent qu'elles sont encore souvent intégrées à des dispositifs expérimentaux, plus encore que les systèmes à ombrières fixes.

Les dispositifs de mobilité des modules photovoltaïques sont variés : ils peuvent présenter une mobilité biaxe comme l'installation expérimentale INRA/EDF ou les installations REM TEC, ou sur un seul axe, soit en rotation comme les installations Sun'R ou en coulissage comme les installations OMBREA.

2.2.4. Systèmes avec serres photovoltaïques




Caractérisation du système PV agricole			Maturité du système			Photographies
Type d'installation	Type de production	Synergie PV / production agricole	Expérimenté, installé ou en projet	Installation identifiée	Année de mise en service	
Serre PV	Arboriculture (exemple kiwi, abricot)	Microclimat et protection plantes voire utilisation de l'énergie	Installé en France	Exemple sur Kiwi REDEN Solar, sur abricot Akuo, (5 installations recensées)	Depuis 2016	 https://reden.solar/
	Maraîchage	Microclimat et protection plantes voire utilisation de l'énergie	Installé en France	Exemple REDEN Solar, Akuo - Focola, Nouvelle-Calédonie (25 installations recensées)	Depuis 2010	 https://reden.solar/
	Horticulture (exemple : roses, pivoine, lys et anthurium)	Microclimat et protection plantes voire utilisation de l'énergie	Installé en France	Exemple sur roses et pivoines REDEN Solar, sur lys et Anthurium Akuo (3 installations recensées)	Depuis 2010	 www.akuoenergy.com

Tableau 6: Types de couplages entre serres photovoltaïques et production agricole dans le monde

Les serres photovoltaïques sont des installations généralement identiques aux serres classiques, sur lesquelles des modules photovoltaïques remplacent des verres horticoles en toiture. Elles diffèrent donc principalement des serres classiques par l'ombrage sous-jacent. Les installations testées initialement présentaient des taux de couverture assez importants, et un ombrage non supporté par tous les types de cultures.

2.2.5. Autres systèmes




Caractérisation du système PV agricole			Maturité du système			Photographies
Type d'installation	Type de production	Synergie PV / production agricole	Expérimentée, installée ou en projet	Installation identifiée	Année de mise en service	
PV toiture	Elevage en stabulation	Autoconsommation de l'énergie produite	Installé en France	Nombreuses installations	2006/2008 ?	 https://cutt.ly/Bynv2DE
	Stockage et fourrage	Autoconsommation de l'énergie produite	Installé en France	Nombreuses installations	NA	 www.corsicasole.com https://cutt.ly/hynbrvA
PV sur matériel agricole	Grandes cultures (exemple maïs)	Autoconsommation de l'énergie produite	Installé en France	Exemple des modules sur rampe d'irrigation de la société Aquitaine Aérogénérateurs	NA	 Lafranceagricole.fr

Tableau 7: Autres types de couplages photovoltaïques et production agricole dans le monde

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

Une dernière typologie de « systèmes photovoltaïques sur matériel agricole » (par exemple sur rampe d'irrigation ou sur pompe) a été identifiée, bien qu'elle reste encore très spécifique et assez anecdotique. Ce type d'installation peut permettre l'utilisation d'électricité dans des zones non raccordées ou ne disposant pas d'électricité à proximité immédiate.

2.3. Systèmes photovoltaïques agricoles retenus pour une caractérisation approfondie

Les systèmes retenus pour une caractérisation approfondie via une fiche détaillée sont listés dans le tableau ci-dessous.

N°	Nom des systèmes	Type d'installation	Type de production
1	Centrale au sol avec pâturage ovin (voire apiculture)	Centrale au sol	Pâturage (+ voire apiculture)
2	Centrale au sol / Ombrières fixes avec maraîchage/baies	Centrale au sol ou ombrières fixes	Maraîchage/production de baies
3	Centrales verticales bifaciales	Centrales verticales bifaciales	Pâturage et/ou maraîchage
4	Ombrière fixe sur grandes cultures	Ombrière fixe (surélevées)	Grandes cultures
5	Ombrière fixe sur vigne et arboriculture	Ombrière fixe (surélevées)	Viticulture et arboriculture
6	Ombrière fixe pour élevage et/ou pâturage	Ombrière fixe (surélevées)	Elevage et/ou pâturage
7	Ombrière mobile sur vigne	Ombrière mobile (surélevées)	Vignoble
8	Ombrière mobile sur arboriculture	Ombrière mobile (surélevées)	Arboriculture
9	Ombrière mobile sur maraîchage	Ombrière mobile (surélevées)	Maraîchage et horticulture
10	Serre PV en arboriculture	Serre PV	Arboriculture
11	Serre PV en maraîchage	Serre PV	Maraîchage
12	Serre PV en horticulture	Serre PV	Horticulture
13	PV sur toiture en autoconsommation	PV toiture	Elevage en stabulation ou stockage/fourrage
14	Protection PV piscicole	Protection PV ou centrales flottantes	Pisciculture
15	PV sur matériels agricoles	PV divers	Rampes d'irrigation, canaux d'irrigation, autres

Tableau 8: Liste des systèmes retenus pour faire l'objet d'une fiche détaillée

Parmi les systèmes existants, les centrales au sol en horticulture et les ombrières fixes sur plantes médicinales n'ont pas été retenues, car elles représentent vraisemblablement des potentiels de développement relativement faibles.

Il est à noter que deux systèmes, bien qu'ils soient encore à un stade de développement « projet » (installation non encore en production), ont également été sélectionnés car présentant des intérêts particuliers :

- les centrales à modules verticaux bifaciaux qui revêtent un intérêt particulier de par leur emprise au sol très faible ;
- les centrales au sol sur maraîchage qui présentent l'intérêt de couvrir une diversité importante de cultures maraîchères et de baies.

De plus, plusieurs systèmes ont été étudiés conjointement dans le cadre des fiches :

- Les systèmes d'ombrières fixes sur arboriculture et sur vigne, car il n'existe qu'une seule installation en France qui intègre les deux types de production sous la même ombrière.

- Les systèmes photovoltaïques sur toiture en autoconsommation sur bâtiment d'élevage en stabulation et sur bâtiment de stockage de fourrage, car le couplage entre production photovoltaïque et activité agricole correspond à l'autoconsommation énergétique, et diffère peu d'un type de production agricole à l'autre.
- Les systèmes de protection photovoltaïque sur pisciculture et les centrales flottantes aquacoles, car les synergies sont proches et que peu d'éléments existent pour étudier le système de centrale flottante aquacole.

3. Performance des systèmes photovoltaïques agricoles

3.1. Méthodologie d'étude de la performance des systèmes photovoltaïques agricoles

Pour l'étude de la performance des systèmes photovoltaïques agricoles, la littérature scientifique a été principalement utilisée. La recherche bibliographique a été menée, telle que décrite dans le paragraphe précédent.

Les publications identifiées ont été caractérisées précisément à travers les critères d'analyse suivants :

- Nom, auteurs, année, nom du canal
- Type de document (article scientifique, document réglementaire,)
- Type d'installation photovoltaïque (centrale au sol, ombrières surélevées fixes ou mobiles, serres PV, PV sur bâti)
- Type de productions agricoles/types de cultures
- Localisation géographique
- Type d'information apportée
- Résultats

Une synthèse des résultats sur la performance des systèmes est proposée à travers (i) le prisme énergétique d'abord, (ii) le prisme agricole ensuite, (iii) le prisme environnemental enfin.

3.2. Performance énergétique des systèmes photovoltaïques sur terres agricoles

3.2.1. Caractéristiques des installations et impacts sur la performance énergétique

La performance énergétique des systèmes photovoltaïques sur terre agricole est généralement inférieure ou égale aux systèmes sans activité agricole. En effet, un des objectifs de ces systèmes étant de maintenir des rendements agricoles « acceptables » ou d'intégrer le bien-être animal pour l'élevage, la production d'électricité via les modules photovoltaïques est généralement diminuée. Des solutions sont expérimentées pour optimiser les deux productions simultanément.

Le tableau ci-dessous présente les principaux caractères de ces structures photovoltaïques spécifiques. Une analyse plus détaillée est développée, par la suite, pour chaque caractère.

Caractère	Ajustements du système photovoltaïque sur terre agricole	Conséquences sur la production d'électricité
Configurations des modules : - Densité - Hauteur - Répartition	- Espacement plus important des rangées de modules PV - Nombre moindre de modules par rangée - Rehaussement des rangées/modules	MW/ha plus faible : réduction de la puissance installée par unité de surface de foncier.
Modulation de l'orientation des modules PV	Modulation dynamique de l'angle d'inclinaison des modules pour maintenir un certain niveau de production agricole ou l'optimiser.	kWh/kW plus faible : réduction du productible électrique à puissance constante par effet de réduction du nombre d'heure de fonctionnement à puissance nominale.
Technologies de modules PV	Utilisation de technologies permettant de laisser passer une partie du rayonnement (panneau à densité de cellules PV diminuée, modules PV semi-transparents)	W/m² de panneau plus faible : diminution des rendements de conversion énergétique

3.2.1.1. Configurations des modules photovoltaïques

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

L'expérimentation de l'INRA Montpellier, support de plusieurs publications (Dupraz et al., 2011a ; Dupraz et al., 2011b ; Marrou et al., 2013) dispose d'une installation (ombrières) :

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

Pour l'installation en FD, la radiation lumineuse captée par les modules photovoltaïques est de 72 W/m², contre 36 W/m² en HD (Dupraz et al., 2011a). Le rendement électrique de ces deux installations est de 1 et 0,52 respectivement (Dupraz et al., 2011b).

De la même manière, Sekiyama et al. (2019) ont étudié des installations à haute et faible densités : elles sont caractérisées par 8 champs de modules espacés de 0,71 m et 4 champs de modules espacés de 1,67 m, et se traduisent respectivement par des productions électriques d'un rapport de puissance de 2 à 1.

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

- (i) « Ground mounted », 1 m au-dessus du sol, 1400 modules/hectare, espacement entre les lignes de modules photovoltaïques de 6m ;
- (ii) « Stilt mounted full density », 4 m au-dessus du sol, 2400 modules/hectare, espacement entre les lignes de modules photovoltaïques de 3,2 m ;
- (iii) Stilt mounted half density », 4 m au-dessus du sol, 1300 modules/hectare, espacement entre les lignes de modules photovoltaïques de 6,4 m.

Les puissances électriques sont respectivement de (i) 420 kW/hectare, (ii) 720 kW/hectare, (iii) 390 kW/hectare. Ces configurations sont comparées à d'autres, et à travers les distances entre modules photovoltaïques également, dans la figure ci-dessous.

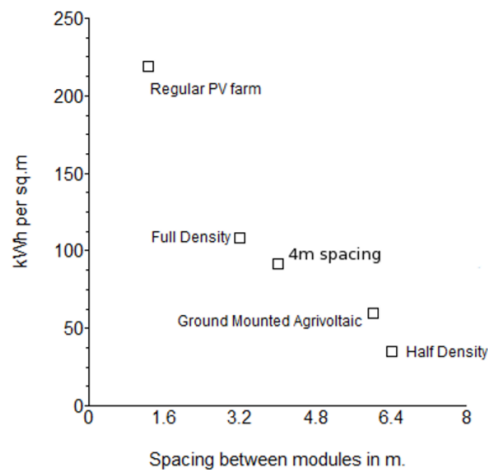


Figure 5: Lien entre densité de production (kWh/m²) et espacement. Source : Dinesh et Pearce 2016

Au-delà des différences de densités de modules, les différences d'angles d'incidences expliqueraient également la variabilité résiduelle de productions entre les systèmes (communication personnelle avec Joshua Pearce).

L'option de diminution de la densité de modules photovoltaïques, sur une structure fixe, pour laisser une plus grande partie des rayonnements aux cultures sous-jacentes réduit, de fait, la production électrique, et ce même pendant les périodes sans besoin d'ensoleillement pour la culture sous-jacente : ces structures ne disposent donc pas de flexibilité pour optimiser la production d'électricité (Marrou et al., 2013).

La répartition des modules a également été étudiée sur des serres photovoltaïques (Yano et al., 2010) : (i) soit disposés en ligne droite, (ii) soit disposés en damier. L'effet sur la production annuelle est faible : 4,08 et 4,06 GJ respectivement, néanmoins, la répartition de l'ombrage en sous-face varie, (i) soit il est spatialement continu, (ii) soit il est spatialement intermittent et donc plus homogène au global.

3.2.1.2. Modulation de l'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques

Les systèmes de modulation de l'angle d'inclinaison des modules, via des trackers, permettent une plus grande flexibilité et une amélioration de la production agricole et/ou de la production électrique.

Par exemple, l'utilisation de tracker a augmenté significativement la production d'électricité en comparaison à des modules photovoltaïques fixes, tout en augmentant légèrement la radiation transmise aux cultures, impliquant une production agricole (en l'occurrence, des laitues) proche ou similaire à celle obtenue dans des conditions sans modules photovoltaïques. En effet, les trackers permettent de placer les plantes dans un microclimat où lumière et bandes d'ombre s'alternent plusieurs fois par jour, contrairement à un système stationnaire où cette alternance est moins fréquente, voire inexistante (Valle et al., 2017). Les systèmes de tracker permettent de résoudre le problème de l'hétérogénéité spatiale de la distribution solaire quotidienne pour les cultures (Yano et al. 2014), de maintenir une transmission minimum de radiation aux cultures, de placer les modules photovoltaïques en position optimale pour la production d'électricité en période sans cultures ou de moindre besoin en rayonnement pour celles-ci et d'optimiser les rendements agricoles et électriques en général (Marrou et al. 2013). Ces systèmes ont pour inconvénient leur coût et leur complexité (Yano et al., 2014).

3.2.1.3. Technologies de modules photovoltaïques

Contrairement aux modules photovoltaïques standards opaques, certaines nouvelles technologies de modules permettent une transmission partielle des rayonnements aux cultures sous-jacentes, qui se traduirait, à priori, par une augmentation de la production agricole.

3.2.1.3.1. Modules à microcellules solaires sphériques et prototypes de modules photovoltaïques semi-transparents et bifaciaux.

Yano et al. (2014) étudient les caractéristiques de deux prototypes de modules pour des applications sur serre photovoltaïque. Leur étude mesure le taux d'ombrage et le productible solaire mais n'exploite pas l'impact sur la production agricole :

- Prototype PV1
 - Utilise 1500 microcellules solaires sphériques avec $15,4 \text{ cellules/cm}^2$; 31% de la surface est couverte par les cellules, le reste est transparent
 - Le pourcentage d'ombrage, représentant le rapport entre l'éclairement « absorbée » par le panneau (irradiance incidente sur le panneau - irradiance transmise à la sortie du panneau) et celle incidente sur le panneau, est de 45%. Par comparaison, ce taux s'élève à 100% pour un module photovoltaïque standard opaque
 - Le maximum de puissance atteint a été de 540 mW.
 - Rendement de conversion = 4,5%
- Prototype PV2
 - Utilise 500 microcellules solaires sphériques avec $5,1 \text{ cellules/cm}^2$; 13% de la surface couverte par les cellules, le reste est transparent
 - Le pourcentage d'ombrage est de 21%.
 - Le maximum de puissance atteint a été de 202 mW.
 - Rendement de conversion = 1,6%

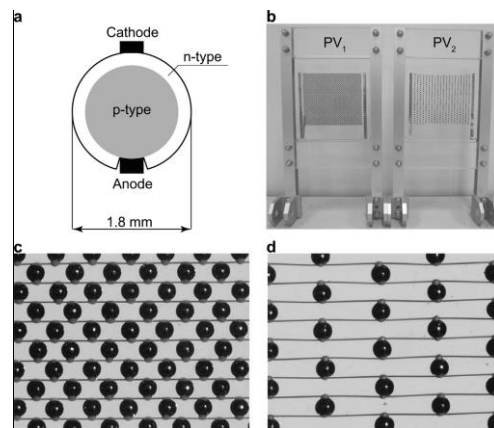


Figure 6: Prototypes de panneaux photovoltaïques à microcellules solaires sphériques étudiés dans l'étude de Yano et al. 2014

3.2.1.3.2. Modules photovoltaïques semi-transparents OPV

J.M Emmott et al. (2015), ont étudié la performance économique de serres avec différents matériaux photovoltaïques organiques (ou OPV) en comparaison avec des cellules CIGS classiques.

- Cette étude montre que les systèmes OPV atteignent rarement les performances économiques des serres, et en particulier car le montant des CAPEX est très élevé.
- Toutefois, certains dispositifs OPV, qui utilisent des matériaux ayant une petite bande interdite, pourraient présenter des potentiels intéressants et présenter de meilleurs résultats économiques que des modules opaques à couche mince classiques tels que les CIGS.

Selon Hassanien et al. (2017), l'ombrage limité de la technologie semi-transparente, n'a pas eu d'impact sur la croissance de la plante expérimentée (laitue). Le poids à l'état frais et à sec des laitues sous serre équipée de modules semi-transparent vs. serre non-équipée de modules photovoltaïques était identique. L'angle d'inclinaison étant calculé pour minimiser l'ombre pour les cultures agricoles - ces ombres ont diminué l'intensité lumineuse sous la serre de 35% par rapport à un revêtement en plastique - et seulement 20% du toit de la serre a été équipé de modules photovoltaïques. Ces modules photovoltaïques ont eu un pic de puissance de 170 Wp et un rendement de 8,25%.

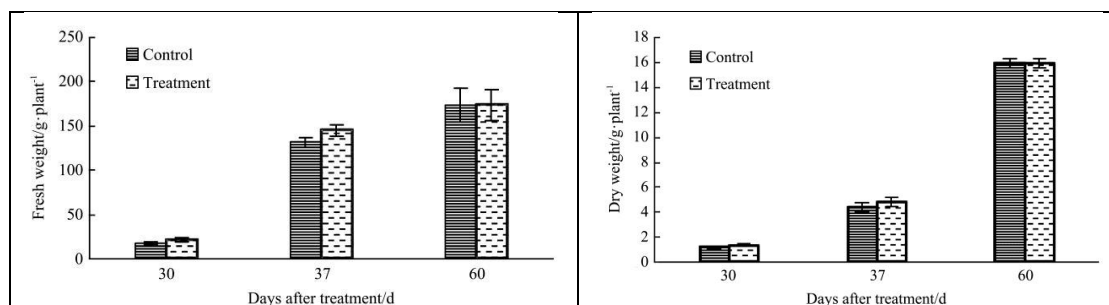


Figure 7 : comparaison des poids à l'état frais et poids à sec sous une serre équipée de modules photovoltaïques semi-transparents vs. serre non-équipée de modules photovoltaïques, source : Hassanien et al. 2017

Enfin, Baxevanou et al. (2020) ont apporté d'autres précisions à la performance des modules PV semi-transparents organiques (OPV). Plusieurs types de panneaux ont été testés et leurs impacts sur le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) a été mesuré au cours de l'année et en particulier en période de végétation. Les essais ont été réalisés à partir de la modélisation d'une serre arquée de panneaux semi-transparents. Quatre installations ont été comparées :

- Une d'un PAR de 30% ;
- Une d'un PAR de 45% ;
- Une d'un PAR de 60% ;
- Une installation comportant uniquement le film PE (sans OPV), qui a pour effet un PAR dans la serre de 89% ;

Le seuil de radiation minimal pour assurer un bon développement des espèces maraîchères est considéré à 4 MJ/m²/jour sur la période de mai à novembre.

Le modèle indique que seule l'installation laissant un PAR de 60% permet d'atteindre ce seuil. Cette installation correspond à un cas où les OPV atteignent 47% de recouvrement de la serre.

En conclusion, ces nouvelles technologies pourraient permettre d'optimiser les rendements agricoles tout en réduisant le moins possible la production d'électricité.

3.2.2. Coût de production du photovoltaïque sur terrains agricoles

Le coût de production de l'électricité est un indicateur permettant de comparer l'efficacité économique de différentes technologies sur une base cohérente. L'équation du coût actualisé de l'énergie, le LCOE (levelized cost of energy), est la suivante :

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+i)^t}}$$

Avec :

- I_0 : investissement initial ou le CAPEX
- A_t : le coût annuel ou les OPEX
- E_t : énergie produite année t
- i : taux d'actualisation, coût moyen pondéré du capital après correction de l'inflation
- n : durée de vie de l'équipement

L'adaptation du système photovoltaïque à une utilisation sur terre agricole impacte son LCOE, généralement à la hausse. Afin d'illustrer cette augmentation, trois situations sont évaluées, la situation de référence et deux types de systèmes photovoltaïques sur terre agricole :

1. La situation de référence consiste en une centrale au sol, dite standard sur terrain dégradé non-agricole, avec une densité de 1MW/ha.
2. Les centrales photovoltaïques sur prairies pâturées, où la densité est considérée égale au système de référence.
3. Les ombrières et les serres photovoltaïques. Ces systèmes sont distingués des centrales sur prairies à cause du niveau d'adaptation important du système photovoltaïque, se traduisant par d'avantage d'équipements, spécialement conçus à cet effet.

Les comparaisons de coût entre les différents systèmes sont faites en considérant des taux d'actualisation et des durées de vie égales (i et n constant dans l'équation du LCOE ci-dessus) :

1. Les centrales photovoltaïques au sol sont devenues de plus en plus compétitive sur les 10 dernières années, grâce notamment à la baisse des coûts des modules photovoltaïques. Aujourd'hui, selon la dernière publication de Lazard sur les LCOE des technologies de production d'électricité, le photovoltaïque serait une des technologies les plus compétitives. Le LCOE international est compris entre 30 et 45 €/MWh, soit environ 10% du LCOE de 2009. En France, le LCOE des centrales au sol varie entre 45 et 81 €/MWh⁶ selon la puissance totale de l'installation considérée.

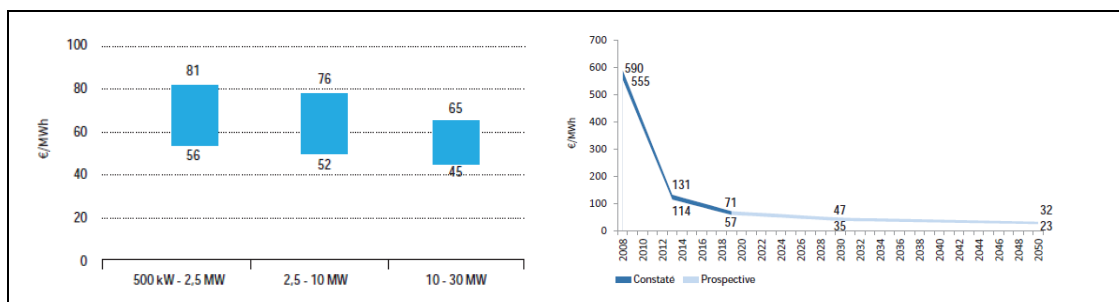


Figure 8 : LCOE actuel et prospectif des centrales PV au sol.
Source : ADEME, Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France, 2020

⁶ Source : ADEME, Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France, 2020

2. Les centrales photovoltaïques sur prairie n'afficheraient pas de LCOE plus importants que les centrales standards. Elles pourraient même bénéficier de quelques avantages qu'offriraient les terres agricoles dans certains cas :
 - CAPEX potentiellement moins important lié à des coûts de travaux moindres de préparation du terrain,
 - OPEX potentiellement moins important lié à de plus faibles coûts de foncier et/ou d'entretien du sol,
 - Energie produite (Et) égale à celle d'une centrale standard.
3. Les serres et les ombrières photovoltaïques sur terres agricoles afficheraient des LCOE plus élevés que les centrales standards (Schindele et al., 2020). En effet, le prix moyen pondéré des dossiers lauréats de la famille 4 agrivoltaïsme de la 1^{ère} période de l'appel d'offre solaire innovant s'est élevé à 86,6 €/MWh (ce chiffre correspond à un prix moyen de vente et serait plus élevé que le LCOE puisqu'il prend en compte la marge du producteur). Schindele et al. (2020) citent un LCOE qui s'élèverait à 82,8 €/MWh, soit 38% de plus que la centrale au sol de référence, évalué par la même étude à 60 €/MWh.

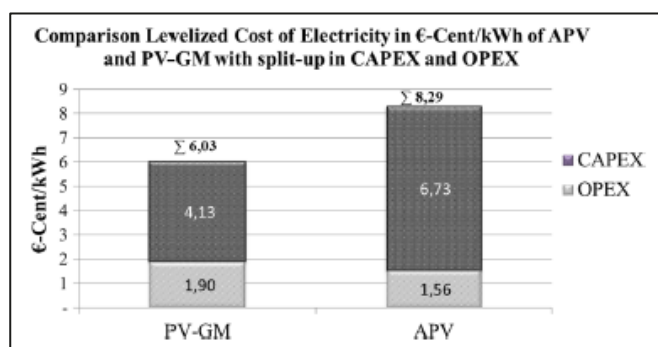


Figure 9 : LCOE d'une centrale PV au sol standard vs. celui d'un système photovoltaïque agricole (APV).
Source : Schindele et al. 2020

Plusieurs facteurs pourraient expliquer ce surcoût :

- CAPEX plus important à cause d'un ou plusieurs des éléments suivants : modules potentiellement plus chers (ex : bifaciaux), structure plus chère car surélevée et/ou renforcée, système de tracker, logiciel d'optimisation du tracker...

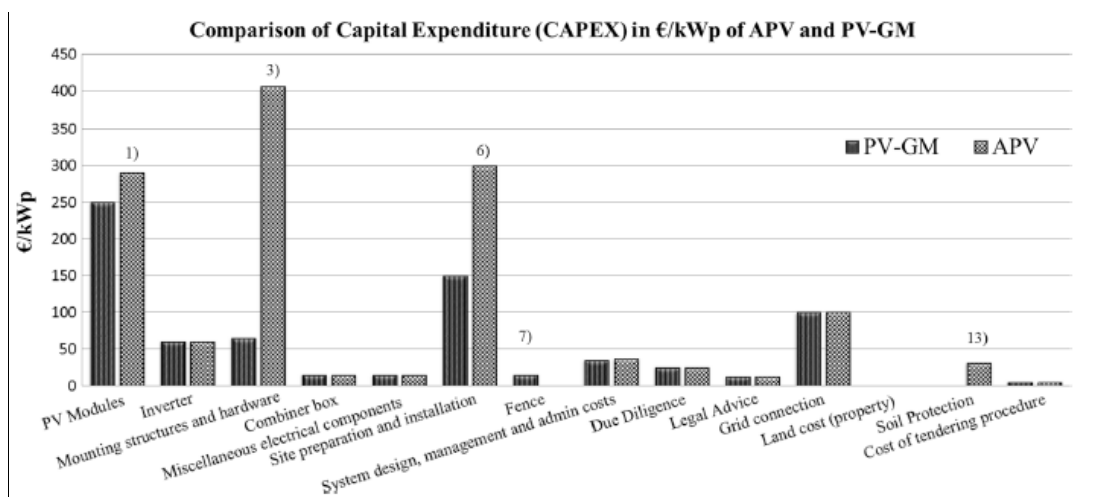


Figure 10 : Décomposition des CAPEX d'une centrale PV standard (PV-GM) vs. système photovoltaïque agricole (APV).
Source : Schindele et al. 2020

- OPEX plus important ou moins important selon les cas : plus faible coût de foncier et/ou d'entretien du sol par hectare, contrebalancé par un besoin plus important en foncier pour une même puissance à cause de la baisse de la densité de puissance (MW/ha), et par le besoin d'une gestion du système des trackers par un tiers pour optimiser la performance agricole.

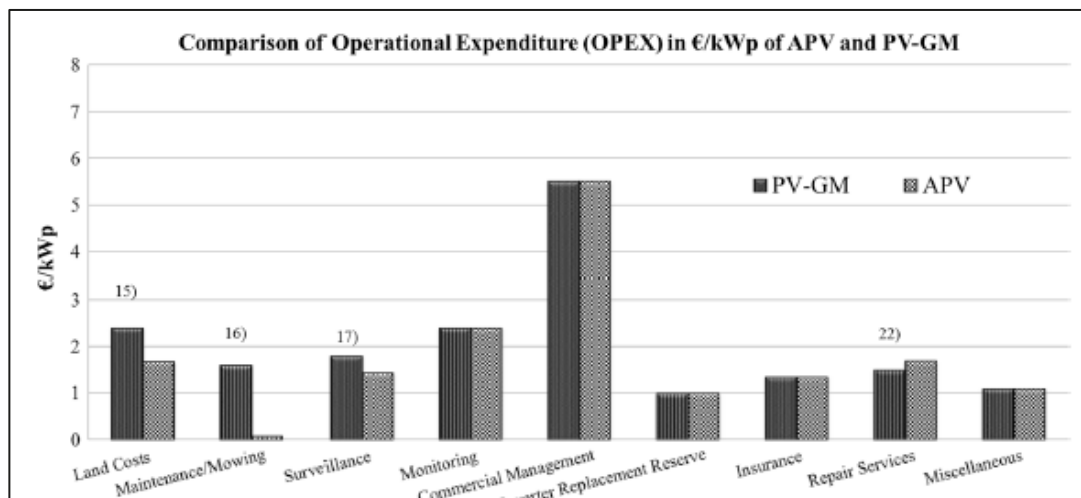


Figure 11 : Décomposition des OPEX d'une centrale PV standard vs. système photovoltaïque agricole (APV).
Source : Schindele et al. 2020

- Energie produite (Et) moins importante. En effet, comme expliqué précédemment, la centrale photovoltaïque s'adapte à la culture en baissant sa densité de puissance (moins MW/ha), ses heures de fonctionnement (kWh/kW) et parfois le rendement de ses modules (W/m²). Cela se traduit par une baisse de la production d'énergie.

3.3. Effets de la présence de photovoltaïque sur les performances agricoles

Les deux activités (agricole et énergétique) doivent se partager l'espace disponible et l'ensoleillement. Ainsi, les rendements respectifs des deux activités sont influencés par les caractéristiques de l'installation photovoltaïque : densité, types de modules, inclinaison, possibilité de pilotage, etc.

L'activité agricole est influencée par quatre grands facteurs, qui peuvent alternativement avoir des effets positifs ou négatifs sur son rendement, sa qualité et son homogénéité: le rayonnement solaire, la température, l'évapotranspiration et l'efficacité de l'eau.

Ainsi, la combinaison d'une production agricole avec une production photovoltaïque sera dépendante des interactions physiques ayant lieu entre chacune de ces productions et influençant directement les quatre facteurs précédemment cités.

Il peut ainsi naître de ce couplage une incompatibilité pour certains facteurs, ou a contrario une amélioration de certains de ces facteurs permettant, par exemple, une protection de la culture face à divers aléas climatiques. Dans tous les cas, le couplage agrivoltaïque demande un équilibrage des 2 composantes, photovoltaïque et agricole, comme présenté dans le schéma ci-dessous.

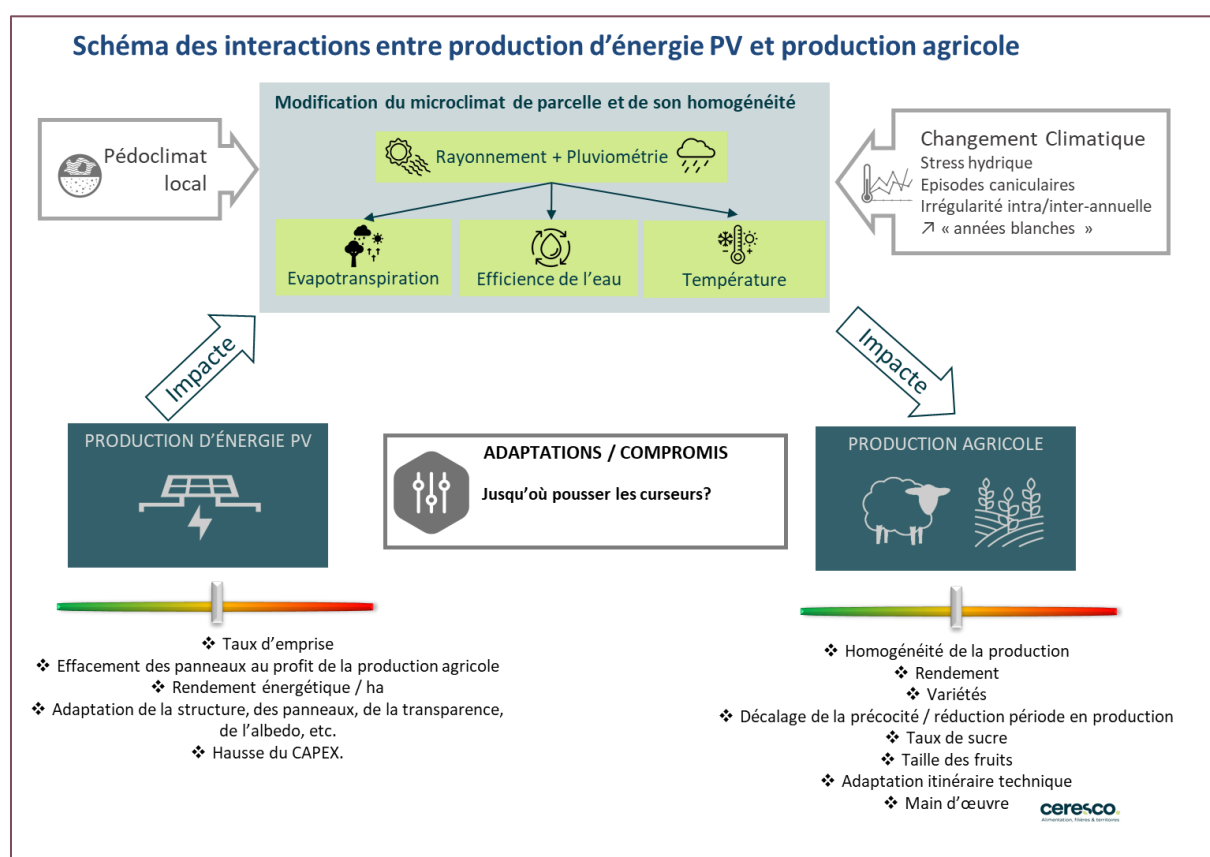


Figure 12 : Schéma des interactions entre production d'énergie PV et production agricole (CERESCO, 2020)

Les paragraphes suivants dressent un état des lieux bibliographique de ces impacts, mais aussi des adaptations possibles.

3.3.1. Impacts du microclimat sur les résultats agronomiques

3.3.1.1. Influence de la diminution du rayonnement solaire sur les résultats agronomiques

La réduction de la lumière liée à la présence de modules photovoltaïques constitue la principale contrainte écophysologique sur la productivité des plantes (Dupraz et al. 2011). Les modules photovoltaïques, placés au-dessus ou à côté des plantes vont venir interférer avec la lumière qu'elles peuvent recevoir, tant sur son intensité que sur sa durée d'exposition. Selon leur positionnement, les modules photovoltaïques peuvent aussi entraîner des alternances d'ombre et de lumière, généralement inexistantes, sur les productions végétales. Ces facteurs vont influencer la transpiration des plantes, l'évaporation de l'eau du sol, et donc l'évapotranspiration totale du système.

Dès le début des années 80, une publication scientifique allemande suggérait qu'un tiers des radiations étaient interceptées si on maximisait la production d'énergie (GOETZBERGER et ZASTROW 1982). On sait maintenant que ces premières estimations étaient sous-estimées et que, même quand la production d'électricité est optimisée, au moins 50% du rayonnement est intercepté par les modules et la structure dans des centrales classiques qui visent à maximiser la production d'énergie.

Concernant les ombrières, les résultats du dispositif expérimental présenté dans la figure ci-dessous montrent bien l'impact des ombrières photovoltaïques sur la luminosité (de 20 à 50% de rayonnement en moins), et donc sur l'évapotranspiration (Y. Elamri et al. 2018).

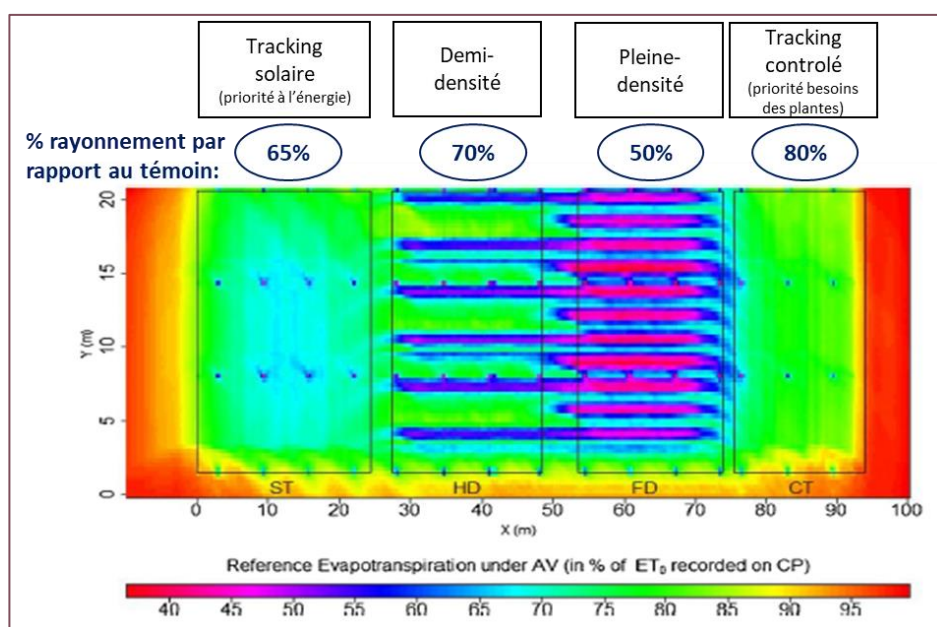
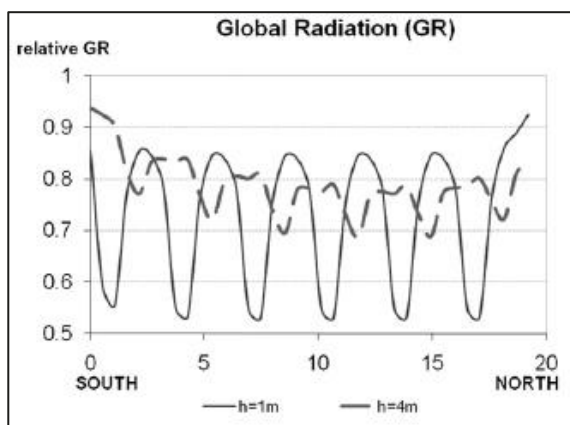


Figure 13: Répartition spatiale simulée de l'évapotranspiration sous différents dispositifs PV, pour une journée de solstice d'été (rayonnement maximal). (Y. Elamri et al. 2018)

Les quatre traitements illustrés sur la Figure 13 montrent une baisse importante de l'évapotranspiration par rapport à la référence, qui correspond à une zone exempte de couverture photovoltaïque (100% de rayonnement reçu). La figure montre aussi l'hétérogénéité du rayonnement sur dispositif fixe (Pleine densité et Demi-densité) et la relative homogénéité sous dispositif mobile⁷.

⁷ Compléments d'explications : le traitement « Tracking Solaire ST » maximise l'irradiation (et donc la production d'électricité) et diminue ainsi l'irradiation du sol de 35%. Au contraire, le traitement « Tracking contrôlé CT » minimise l'interception de la radiation avant 12 h UTC, remet de l'ombrage pendant les heures chaudes et minimise à nouveau l'interception en fin de journée. Ce « *tracking contrôlé* » permet une réduction de seulement 20% de l'irradiation, mais aux dépens de la production d'énergie.



Cette hétérogénéité dépend également de la hauteur des modules. Plus ils sont hauts, plus l'irradiation est homogène au niveau du sol (Sekiyama et Nagashima 2019). Cela signifie que l'hétérogénéité des radiations augmentera avec la croissance des plantes, compte tenu de la diminution progressive de l'espace entre les modules et les plantes, comme le suggère la figure ci-contre. Cela est particulièrement vrai pour des productions hautes comme le maïs, la banane, l'arboriculture.

Figure 14: Effet de la hauteur des modules (1m vs 4m) sur l'hétérogénéité de la distribution de la lumière (Dupraz et al., 2011)

Il est aussi important de noter que les effets de bords liés à la faible taille des dispositifs introduisent des biais dans l'interprétation des résultats. Ici, les effets de bords ont lieu sur un axe Sud-Nord, et l'irradiation est relativement homogène dans un axe Est-Ouest.

Concernant les serres photovoltaïques, les publications disponibles sont très disparates, compte tenu de la diversité des structures et des cultures.

En France, six essais complets et très bien documentés ont été menés par l'APREL⁸, directement sur des sites exploités par des agriculteurs (Goillon 2016; 2012; Goillon et al. 2016; 2013; Goillon et Camoin 2017). Plusieurs modèles de serres (photos ci-dessous) ont fait l'objet de suivis agronomiques pour caractériser les conditions de production, évaluer les performances de cultures, rechercher des adaptations techniques et in-fine, informer les producteurs adhérents de l'APREL.



Figure 15: diversité des types de serres existants en France et étudiés par l'APREL dans la zone sud-est (source : APREL)

Ces travaux montrent que dans trois situations différentes de serres, la transmission de rayonnement photosynthétique actif est de 30% en moyenne, soit 40% de moins que sous serre tunnel plastique. L'analyse des données montre que la répartition de la lumière dans les serres PV étudiées est hétérogène au cours de la journée, du fait de l'ombre portée des panneaux en toiture, qui se déplace au fur et à mesure de la course du soleil (figure ci-dessous). Des cultures comme la courgette supportent très mal ce type d'alternance. A cette très forte hétérogénéité spatiale s'ajoute le fait que le taux d'ombrage apporté par les serres est plus important en hiver qu'en été, ce qui est potentiellement contraire aux besoins des cultures.

⁸ <https://aprel.fr/>

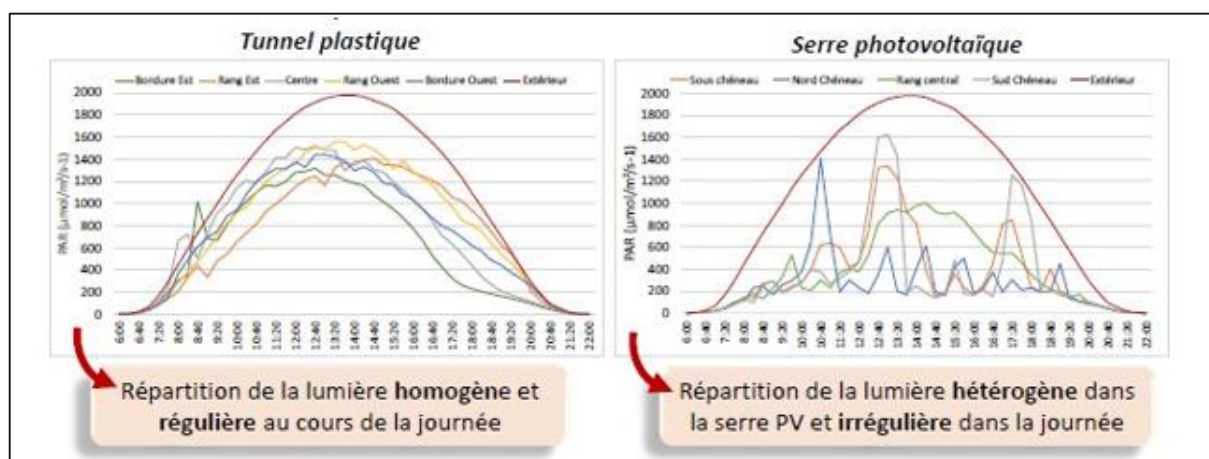


Figure 16: rayonnement photosynthétique actif mesuré au cours de la journée du 23 juillet 2018 sous tunnel plastique et sous serre photovoltaïque. Capteurs placés en largeur de chapelle ou du tunnel sur un axe Est/Ouest. La ligne rouge correspond au PAR mesuré à l'extérieur (source : APREL)

La présence des panneaux photovoltaïques influence aussi le climat de la serre. Les périodes d'ouverture des ouvrants sont généralement définies pour optimiser la production agricole (trop sec ou trop humide). Les travaux de l'APREL montrent ainsi que l'aération n'est donc pas toujours en adéquation avec les besoins des plantes. Les observations agronomiques montrent un retard de développement de 3 à 4 semaines et une perte de rendement d'environ 50% par rapport à des cultures sous abris du même créneau.

Les plantes présentent aussi des désordres physiologiques sur la floraison et la nouaison. L'aspect et la qualité des produits est impactée, avec des fruits de calibre réduit ou plus fragiles. Dans certains cas, des maladies et ravageurs semblent avoir été favorisés par une gestion plus complexe du climat et des plantes sanitaires plus fragiles. Parmi les 40 espèces maraîchères étudiées par l'APREL, la majorité ont montré un mauvais comportement sous serre photovoltaïque. Quelques résultats corrects ont été observés sur des plantes aromatiques et des concombres en été, des betteraves et choux raves en hiver.

Espèces	Observations	Rendement (perte/ abri classique même créneau)
Tomate	Bouquets pliés, plantes étiolées, maturation longue	-60 à -70%
Melon	Retard de production, dégâts d'oïdium, petit calibre	-55 %
Aubergine	Floraison et nouaison difficiles, pucerons	-50%
Poivron	Floraison et nouaison difficile, entrée en récolte tardive	-81%
Courgette	Défauts de pollinisation, coulures de fleurs, production par vague	- 50 %
Concombre	Oïdium, pucerons	-20 à -80%
Fraise	1 mois de retard, petit calibre, botrytis	-53%

Figure 17: Observations physiologiques et baisses de rendement observées par l'APREL pour les principales espèces concernées par les serres PV en zone provençale (Goillon and Deboisvilliers, 2018).

Les travaux de l'APREL montrent enfin que les conditions climatiques et la faible exposition lumineuse modifient les besoins des plantes en eau et nutriments. **Une adaptation complète des itinéraires techniques de culture est ainsi nécessaire et les auteurs rappellent qu'il n'existe pas de références sur ces adaptations.**

Toujours concernant les serres, il existe un autre travail de recherche (Fatnassi et al. 2015) qui s'est attaché à simuler la distribution du rayonnement solaire, de l'air thermique et de la vapeur d'eau dans deux structures de serres photovoltaïques : Venlo et asymétrique. Les principaux résultats sont les suivants :

- le rayonnement solaire est plus uniformément réparti dans la serre Venlo que dans la serre asymétrique (46% de transmission lumineuse sous Venlo contre 41,6% sous serre asymétrique),
- la configuration des modules photovoltaïques en damier sur le toit améliore l'équilibre de la répartition de la lumière reçue dans la serre, par rapport à un alignement linéaire des modules.

L'étude souligne aussi que les modélisations de productions agricoles élaborées à ce jour sont incapables de prédire la productivité des cultures soumise à des alternances de lumière/ombre.

D'autres travaux, réalisés en Italie, montrent que l'impact d'une serre photovoltaïque est très fort sur la culture des légumes d'été comme les tomates (Bulgari et al. 2015), où l'on observe généralement un plus faible nombre de fleurs, une forte baisse de la taille des fruits et de leur teneur en sucres (Bertin et al. 2015). La baisse du taux de sucres dégrade généralement la qualité gustative et le potentiel de commercialisation, sauf pour la vigne où cela peut améliorer la qualité gustative des vins. Les auteurs soulignent le besoin d'identifier les espèces et variétés adéquates ainsi que les itinéraires techniques appropriés pour contrebalancer la baisse du rayonnement et des températures.

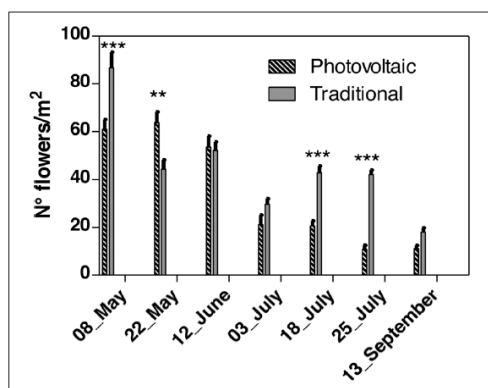


Fig. 6 - Flowers number for each sampling date. Values are means with standard errors ($n=10$). Data were subjected to two-way ANOVA analysis and differences among means were determined using Bonferroni's post-test. Asterisks indicate statistical differences between means, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$.

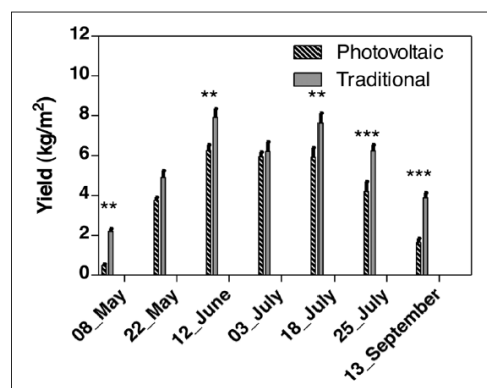


Fig. 7 - Yield of tomato plants grown in traditional and PV greenhouse. Values are means with standard error ($n=10$). Data were subjected to two-way ANOVA analysis and differences among means were determined using Bonferroni's post-test. Asterisks indicate statistical differences between means, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$.

Figure 18: Comparaison de rendements de tomates sous serre (PV vs traditionnelle) en Italie (Bertin et al., 2015)

Enfin, une étude Italienne (Cossu et al. 2014), menée en Sardaigne sur des tomates, montre également une baisse du rendement, de moitié dans des serres couvertes par 50% de photovoltaïque par rapport à une serre plastique (baisse de seulement 18% en bordure de serre). La couverture de 50% par des modules photovoltaïques entraîne une réduction annuelle de rayonnement solaire de 64% (avec un gradient nord-sud), s'échelonnant entre 82% de réduction sous les modules et 46% sous les zones de toiture en plastique. La température moyenne observée durant les mois les plus froids est en-dessous du seuil minimum de 12°C, facteur limitant pour la maturation des fruits (nov-janv), contrairement aux serres plastiques conventionnelles. L'étude montre aussi que l'économie liée à la supplémentation de lumière et de chaleur par autoconsommation de l'électricité produite est inférieure au coût du dispositif d'éclairage et de chauffage, ce qui limite l'intérêt économique d'utiliser l'énergie des modules pour supplémer la serre en lumière artificielle. Les rangées de tomates au droit des modules photovoltaïques sont pénalisées principalement dans le cycle de nov-janv en raison de l'indice de précocité plus bas et une tendance des prix plus favorable en milieu de récolte. Finalement le revenu provenant de l'électricité photovoltaïque est largement supérieur au revenu de la production agricole, puisque les rendements sont fortement impactés du fait de l'ombrage des modules.

Concernant la capacité des plantes à supporter la baisse de luminosité, des travaux soulignent que peu d'études sur la tolérance des plantes à l'ombrage sont disponibles (Sekiyama et Nagashima 2019; Dupraz et al. 2011). Une étude du Japon rapporte des différences concernant le point de saturation à la lumière (Solar Sharing Network 2018). Ces résultats sont rapportés dans le tableau ci-après.

Crops	Light Saturation Points (KLX)	Crops	Light Saturation Points (KLX)
Corn	80–90	Rice	40–45
Watermelon	80–90	Carrot	40
Tomato	80	Turnip	40
Taro	80	Sweet potato	30
Cucumber	55	Lettuce	25
Pumpkin	45	Green pepper	20–30
Blueberry	45	Spring onion	25
Cabbage	45	Mushroom	>20

Tableau 9: Taux de saturation à la lumière de différentes espèces cultivées (Sekiyama and Nagashima, 2019)

En théorie, quand le point de saturation est atteint, l'augmentation de la lumière n'a plus aucun impact sur le rendement, à l'image d'une éponge saturée en eau qui ne pourrait ainsi plus accepter d'eau supplémentaire. Les cultures, ayant le point de saturation le plus bas, seraient donc les moins impactées par la présence de modules et inversement. Des cultures comme l'oignon (Kadowaki et al. 2012), la salade, la patate douce, les navets ou encore les carottes seront en théorie moins affectées par l'ombrage que du maïs, de la pastèque ou de la tomate. Non présente sur le tableau, il semblerait que la banane optimise l'utilisation de la lumière jusqu'à des niveaux d'ombrage importants (Senevirathna, Stirling, et Rodrigo 2008).

La difficulté à isoler ce paramètre de saturation à la lumière parmi les effets indirects de la baisse d'ombrage (température, évaporation, etc.) est un élément important à considérer : la productivité d'une culture dépendant évidemment d'une multitude de facteurs, dont beaucoup sont impactés par l'énergie apportée au système par le soleil.

Une autre étude menée en zone tropicale (Johnston et Onwueme 1998) sur des patates douces, du taro et du manioc, cultivés sous différents niveaux d'ombrage, montre une relative capacité d'adaptation de ces plantes, notamment par un élargissement des feuilles et une hausse de la concentration de chlorophylle et de caroténoïdes dans ces dernières. D'autres travaux menés en France sur des salades et avec 2 densités de modules différents (Marrou, Wery, et al. 2013) montrent que le rendement relatif (par rapport au témoin) est supérieur à la radiation relative, ce qui signifie que la plante s'adapte et qu'il n'y a pas une relation linéaire entre baisse de la radiation lumineuse et rendement. En effet, les salades augmentent la taille de leurs feuilles (tout en réduisant leur nombre), et en changeant la distribution dans l'espace (figure ci-dessous).

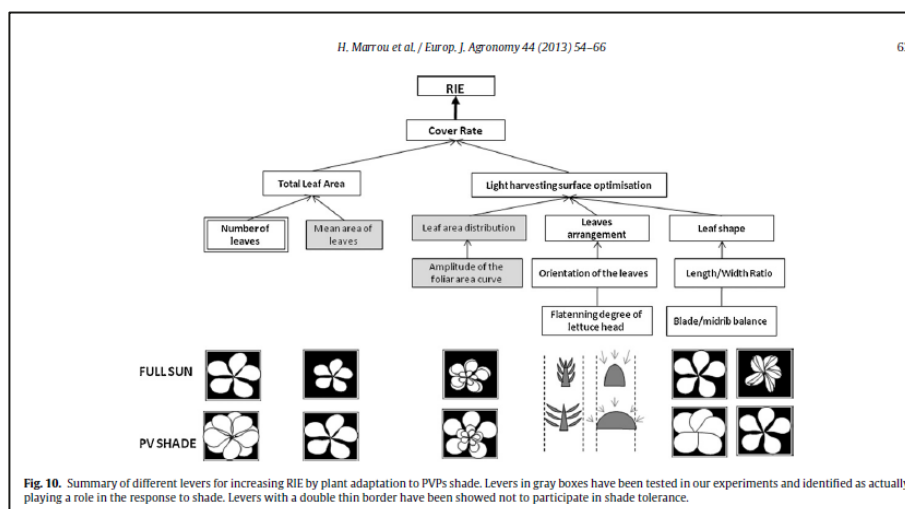


Figure 19 : Synthèse des différents leviers mobilisés par la salade pour maximiser l'interception de la lumière (Marrou et al., 2013c)

Enfin, une autre étude réalisée par l'institut Fraunhofer (Trommsdorff, s.d.) souligne l'existence de cultures plus adaptées que d'autres, notamment les légumes feuilles, le houblon et les petits fruits rouges, avec selon eux, un potentiel de production potentiellement supérieur malgré une radiation photosynthétique plus faible.

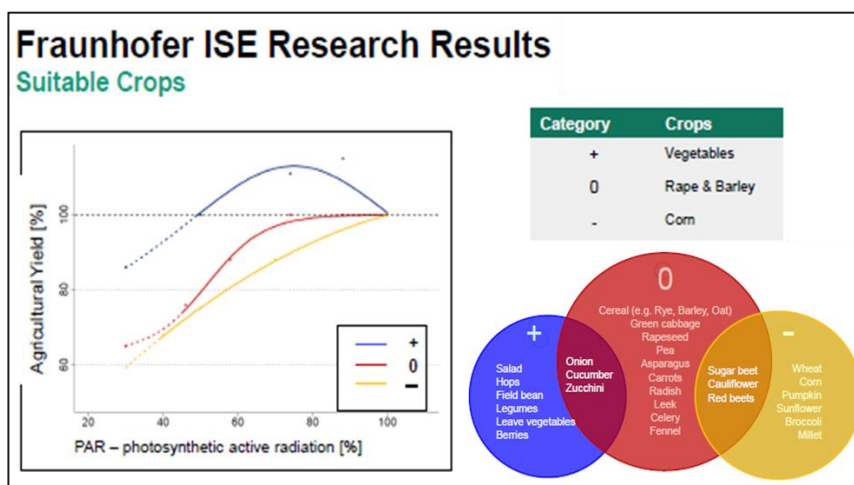


Figure 20 : Synthèse des cultures les plus adaptées à l'ombrage des modules selon l'institut Fraunhofer (Trommsdorff, n.d.)

Les auteurs appellent aussi à réfléchir à des solutions techniques permettant d'orienter les modules photovoltaïques quand la radiation photosynthétique est déficitaire, ou encore à développer et expérimenter des modules solaires semi-transparents ou capables de laisser passer les longueurs d'ondes utilisées par la photosynthèse. Ce phénomène physique ne captant que les longueurs d'onde rouges et bleues, les plantes n'absorbent pas les longueurs d'onde vertes mais les reflètent : ces dernières pourraient donc être converties en électricité tout en permettant aux plantes sous les modules de s'épanouir. Un prototype de ce type de serre « magenta » existe en Californie (technologie WSPV pour «Wavelength-Selective Photovoltaic Systems») et les premiers résultats sont encourageants : aucun effet sur le rendement des épinards et des salades, des fruits plus nombreux (mais plus petits) pour les tomates, mais un rendement plus faible pour les fraises (McNulty 2017).



Figure 21: Photo d'une toiture de serre magenta, prototype réalisé par l'Université de Santa Cruz, en Californie (McNulty, 2017)

3.3.1.2. Effets de la présence de photovoltaïque sur la température en période de croissance végétale

Des travaux menés sur le microclimat d'une centrale au sol sur prairie pâturée au Royaume-Uni (Armstrong, Ostle, et Whitaker 2016) montrent des différences significatives de température liées à la présence de modules. Les auteurs constatent des températures plus faibles sous les modules du printemps à l'automne, mais avec des variations journalières moins fortes. Sur deux saisons contrastées en termes de pousse fourragère, les résultats observés sur les températures entre modules, sous module et sur le témoin sont les suivants :

- En hiver : les températures de l'air et du sol sont plus froides entre les modules et la température du sol est supérieure sous les modules que sur le témoin. Il en résulte un fort impact sur la température du sol entre les modules (plus basse), alors que c'est cette zone qui reçoit le meilleur ensoleillement.

- En été : les températures sont plus élevées la nuit sous les modules et plus faibles la journée. Il en résulte des sols plus froids sous les modules, en moyenne, à cette période.

Globalement, la radiation photosynthétique active est 92% plus faible sous les modules, avec une proportion de 90% de radiation diffuse, contre 79% dans la zone témoin.

En termes de résultats en production, les durées de croissance demeurent inchangées mais la biomasse produite est plus faible en raison de la baisse de température moyenne sous les modules. En effet, la biomasse aérienne est 4 fois supérieure entre les modules et dans le témoin que sous les modules. La diversité d'espèces y est aussi plus faible car il est aussi observé une disparition totale des légumineuses fourragères comme le trèfle et plus de zones nues (cf. tableau ci-contre).

Table 1. Differences in plant community composition and productivity in under, control and gap areas: percentage cover of plant species and bare ground, number of species, non-grass:grass, and above ground plant biomass (g dwt m⁻²) between the treatment plots (mean ± SD). Different letters denote a significant difference ($p < 0.05$) in the number of species, non-grass:grass and biomass between treatments.

	Species	Control	Gap	Under
Forbs	<i>Leucanthemum vulgare</i>	0.8 ± 1.5	2.0 ± 2.4	0.0 ± 0.0
	<i>Plantago lanceolata</i>	7.5 ± 8.7	1.3 ± 2.5	0.0 ± 0.0
	<i>Achillea millefolium</i>	10.0 ± 8.2	18 ± 35.0	20.0 ± 26.0
	<i>Ranunculus acris</i>	0.8 ± 1.5	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0
Legumes	<i>Trifolium repens</i>	24.0 ± 10.0	9.8 ± 4.1	0.0 ± 0.0
	<i>Lotus corniculatus</i>	1.3 ± 2.5	10.0 ± 17.0	0.0 ± 0.0
	<i>Onobrychis viciifolia</i>	1.0 ± 2.0	0.8 ± 1.5	0.0 ± 0.0
Grasses	<i>Phleum pratense</i>	6.3 ± 7.5	21.0 ± 27.0	15.0 ± 7.1
	<i>Poa spp. (pratensis or annua)</i>	24.0 ± 11.0	20.0 ± 15.0	41.0 ± 26.0
	<i>Brachypodium sylvaticum</i>	8.8 ± 12.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0
	<i>Festuca rubra</i>	3.8 ± 4.8	1.3 ± 2.5	3.8 ± 7.5
Other	Dead/bare	13.0 ± 2.9	16.0 ± 7.5	20.0 ± 10.0
	Number of species	4.8 ± 1.0 ^{ab}	5.8 ± 2.2 ^a	2.8 ± 0.5 ^b
	Non-grass:grass	1.5 ± 0.5 ^a	1.6 ± 0.9 ^{ab}	0.3 ± 0.3 ^b
	Biomass	511.1 ± 102.8 ^a	599.5 ± 143.1 ^a	131.6 ± 46.5 ^b

Tableau 10 : Différence de diversité floristique et de productivité sous les modules, entre les modules et sur la zone témoin

Des travaux menés sous ombrières (Marrou, Guilioni, et al. 2013) montrent que la présence de modules photovoltaïques n'influence pas ou très peu la température de l'air et l'humidité. Les auteurs notent aussi une moindre présence de rosée sous les modules. Ils précisent que, contrairement aux serres, les ombrières en plein champ permettent suffisamment de circulation d'air pour que les paramètres atmosphériques ne soient pas significativement impactés. Ces travaux devront cependant être confirmés sur des parcelles de plus grande taille.

En revanche, les auteurs signalent la pertinence potentielle de l'ombrage des modules pour protéger les cultures face aux aléas caniculaires et à la raréfaction de la ressource en eau. Des travaux menés à la station expérimentale de la Pugère (PACA) par l'INRAe sur des arbres fruitiers sous ombrière montrent par exemple un maintien de températures fraîches en journée (diminution de -2 à -4°C), une protection face aux gelées printanières (augmentation de + 0,5°C la nuit) ainsi qu'une forte baisse de la demande en eau lors de l'épisode caniculaire de juillet 2019.

A l'inverse, les travaux de Armstrong et al. (2016), cités plus haut, suggèrent que cette baisse de température peut être un facteur de forte baisse de la productivité végétale sous des plus hautes latitudes, comme au Royaume-Uni.

3.3.1.3. Impacts sur l'évapotranspiration et conséquences agronomiques

Comme précisé dans les paragraphes précédents, la présence de modules photovoltaïques influe sur le rayonnement et la température. Ces deux facteurs influencent fortement l'évapotranspiration, qui correspond à la quantité d'eau évaporée au niveau du sol, transpirée par les plantes et interceptée par ces dernières (eau de pluie qui reste sur le feuillage et s'évapore ensuite, et qui donc ne touche pas le sol).

La baisse d'évapotranspiration peut être bénéfique en période chaude et sèche. Un travail mené en cultures maraichères sous ombrières fixes (Marrou, Guilioni, et al. 2013) montre que l'évapotranspiration

est réduite de 10 à 30% avec une lumière variant de 50 à 70% de la pleine radiation solaire (sans modules photovoltaïques), avec des variations observées selon la saison, comme indiqué sur le graphique ci-dessous.

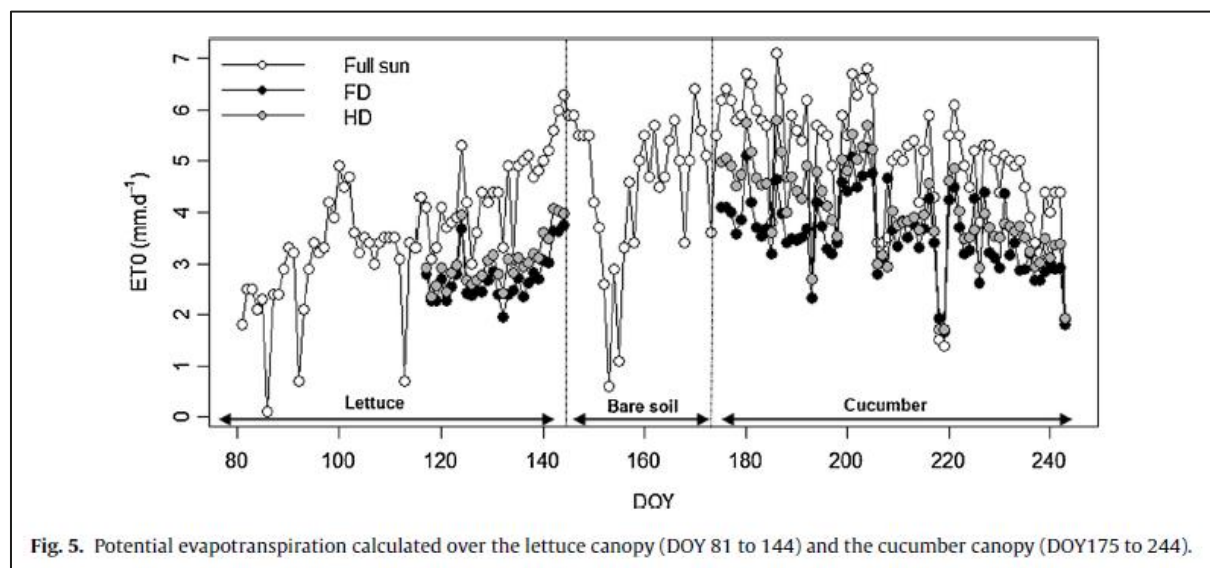


Figure 22 : Evapotranspiration potentielle calculée au-dessus de cultures de salades, concombres et d'un sol nu). (Marrou et al., 2013b). DOY : Day Of Year = Jour de l'année ; FD : Full Density = pleine densité de modules ; HD : Half Density = semi densité

Concernant le rendement, l'accumulation de matière sèche pour les salades atteint 67% (d'un équivalent plein soleil) à pleine densité et 84% à demi-densité de modules, avec de fortes variations entre variétés (figure ci-après). Les variétés « Kiribati » et « Emocion » sont les plus productives sous ombrage, avec un rendement relatif dépassant 80% à pleine densité de modules, et 91% à semi-densité. Pour ces deux variétés, l'efficacité de l'eau est améliorée à l'ombre, de 12 à 35% à pleine densité, et de 21 à 42% à semi-densité, selon la variété. Les concombres s'avèrent être plus sensibles à l'ombrage, avec une baisse de 68% de la matière sèche produite à pleine densité et 21% à semi-densité, avec une diminution moyenne de l'efficacité de l'eau (ratio entre la variation relative de la matière sèche et l'évapotranspiration réelle) de 4%.

Table 5						
Relative dry matter accumulation (DM), Actual evapotranspiration (AET) and water use efficiency (WUE) expressed in % of the full sun for lettuces (between DOY124 to 144) and cucumbers (from DOY175 to 241).						
	FD			HD		
	DM (%)	AET (%)	WUE(%)	DM (%)	AET (%)	WUE (%)
Lettuces						
Emocion	80	71	112	107	75	142
Model	47	71	66	81	75	108
Bassoon	56	71	89	61	75	82
Kiribati	96	71	135	90	75	121
All varieties	67	71	95	84	75	112
Cucumbers	42	79	53	79	82	96

Tableau 11: Accumulation relative de matière sèche (DM) et efficacité de l'eau (WUE) exprimées en pourcentage du plein soleil pour des laitues et des concombres. DOY : Jour de l'année ; FD : pleine densité de modules ; HD semi densité

Une autre étude (Y. Elamri et al. 2018), toujours menée sur des salades, montre des données de rendement obtenues sur quatre dates de récolte, deux au printemps, et deux pendant l'été (tableau ci-contre). Au printemps, une baisse significative de la biomasse (-24% en moyenne) est observée sur la parcelle photovoltaïque par rapport au témoin. En été, des différences existent aussi mais elles sont plus faibles : - 16% en ombrière dynamique et - 31% en semi densité par rapport au témoin. Un léger décalage de date de maturité commerciale est aussi observé sous les modules.

Tableau 12 : Biomasse fraîche et fraction de salade commercialisable pour 2 dates de récolte

L'amélioration de l'efficacité de l'eau (ratio entre la variation relative de la matière sèche et l'évapotranspiration réelle) n'est pas systématique et, apparemment, dépendante du génotype de la plante. Certaines espèces et variétés sont effectivement capables de produire de la biomasse sous photovoltaïque, notamment grâce à une couverture rapide du sol par des feuilles qui améliorent la capture de la lumière et limitent l'évaporation du sol, laissant ainsi plus d'eau pour la plante.

Il doit être enfin noté que des économies d'irrigation de 14% à 29% ont été observées selon l'ombrage. D'autres essais menés sur des vignes à Piolenc (84) par l'INRAE et la Chambre d'Agriculture du Vaucluse montrent une baisse des apports en eau de 12 à 34% selon l'année.

Dans l'ensemble, plusieurs auteurs soulignent que dans un contexte de changement climatique et de raréfaction de ressource en eau, les modules photovoltaïques ont un rôle potentiel à jouer pour atténuer le stress climatique et économiser de l'eau dans le futur. Le défi est en effet d'améliorer l'efficacité de l'eau, tout en maintenant le rendement (Wallace, 2000), ce qu'un ombrage bien maîtrisé peut permettre de réaliser pour certaines cultures et pour certains climats.

Si l'eau n'est pas limitante et l'énergie apportée par le soleil pas trop en excès par rapport aux besoins de la plante, le rendement semble toujours meilleur sans modules (en tous cas, dans un contexte climatique proche de celui observé actuellement en France). En revanche, le maintien de conditions hydriques moins limitantes sous les modules en période de sécheresse peut venir compenser, voire dépasser, la perte de rendement liée à l'ombrage.

En « récoltant » l'excès de soleil avec des modules photovoltaïques, l'évapotranspiration est réduite. Ainsi, en poussant le raisonnement à l'extrême, il est possible d'imaginer, pour des terrains sujets au stress hydrique, de limiter le rayonnement solaire grâce aux modules, équilibrant ainsi l'évapotranspiration potentielle et réelle (Hassanpour Adeg, Selker, et Higgins 2018). Ce type de raisonnement n'est bien sûr pas valable dans des contextes pédo-climatiques limités en ressources solaires, sous des plus hautes latitudes comme au Royaume-Uni, ainsi que présentés par (Armstrong, Ostle, et Whitaker 2016).

3.3.1.4. Impacts sur la pluviométrie au sol et la distribution spatiale de l'eau au sein de la parcelle cultivée.

Les modules solaires couvrant une proportion importante de la surface, on peut supposer qu'ils influent sur la distribution spatiale de la pluviométrie en concentrant les flux. L'information disponible dans la littérature sur les impacts des modules sur la distribution de l'eau et l'érosion est relativement limitée, avec des difficultés à comparer les résultats, compte tenu des différences de contextes pédoclimatiques entre les quelques publications disponibles.

Table 5
Fresh biomass (FM) and fraction of marketable lettuces (F_{ML}) at harvest dates, for the spring and summer cropping cycles, for the solar tracking (ST), controlled tracking (CT) and half density (HD) devices, and the control plot (CP). Harvest 1 took place at maturity in CP, one week before Harvest 2. Within each season, letters in parentheses indicate significant differences in biomass (Wilcoxon test - error risk 5%).

	Spring				Summer			
	ST	CT	HD	CP	ST	CT	HD	CP
Harvest 1								
FM (g)	341.2	334.8	329.3	453.9	338.4	308.8	284.0	409.2
	(b)	(b)	(b)	(a)	(b)	(c)	(c)	(a)
F _{ML} (-)	0.24	0.27	0.21	0.54	0.22	0.23	0.04	0.41
Harvest 2								
FM (g)	493.0	492.2	498.9	636.3	492.7	471.9	397.3	574.4
	(b)	(b)	(b)	(a)	(b)	(b)	(c)	(a)
F _{ML} (-)	0.68	0.62	0.66	0.70	0.76	0.64	0.46	0.77

Le schéma ci-dessous illustre l'influence des modules sur l'équilibre des flux hydriques, en comparant visuellement (taille et localisation des flèches) une situation sans et avec modules (Feistel, s. d.).

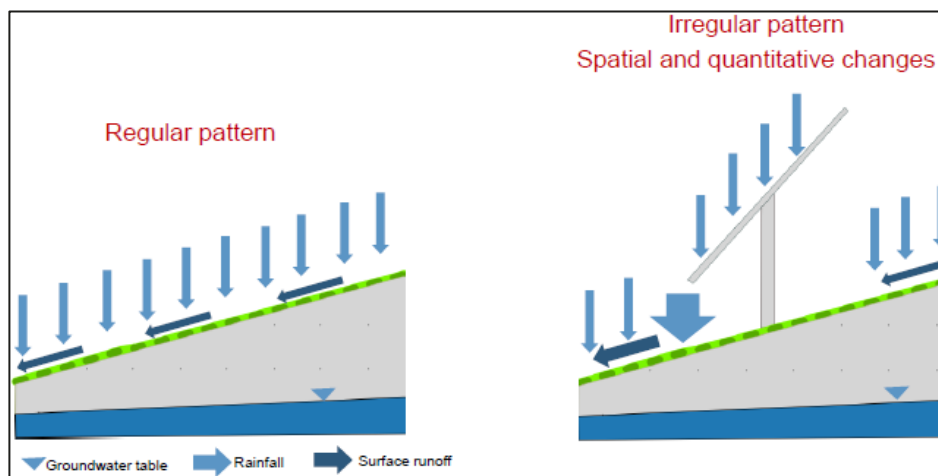


Figure 23: Impact potentiel de la présence de modules solaires sur le budget hydrique

Les mesures effectuées, toujours selon les même auteurs (Feistel, s. d.), montrent les résultats suivants :

- Evapotranspiration réduite (cf. chapitres précédents).
- Rechargement de la nappe : augmenté (plus forte infiltration à la limite des modules)
- Ruissellement augmenté : saturation plus rapide du sol sous la lame d'eau du panneau. L'impact augmente avec la pente.
- Humidité du sol redistribuée : plus forte pendant les périodes sèches et chaudes sous les modules, avec une vitesse de réduction de l'humidité plus faible. Plus humide sous l'écoulement du panneau pendant et à la suite des épisodes pluvieux.

Il doit être noté que, même si les publications n'y font pas référence, un espace de minimum 2 mm est généralement laissé entre les modules qui constituent la « table » photovoltaïque des centrales, laissant ainsi passer des écoulements d'eaux. Ainsi, en fonction de la structure des modules et de son étanchéité, la répartition de l'eau au sol peut être très différente d'une installation à une autre.

L'hétérogénéité spatiale de l'eau du sol sous modules est généralement importante, et très dépendante de la hauteur et de la géométrie de la structure photovoltaïque ainsi que de sa capacité à s'orienter parallèlement à la pluie dans le cas de modules photovoltaïques pilotables (schéma ci-dessous).

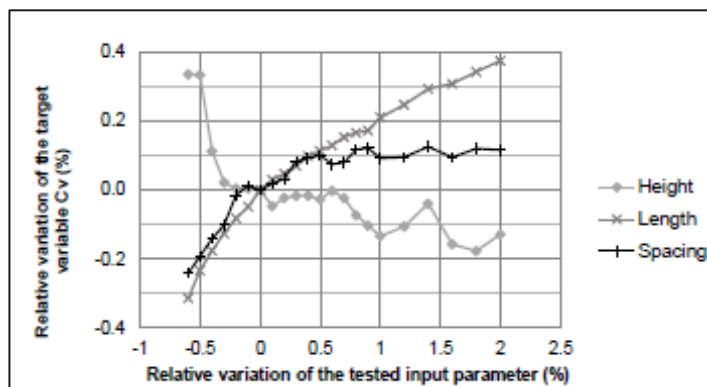


Figure 24: Influence de la structure et agencement des modules (hauteur, longueur et espacement, testés en variation relative (en abscisses du graphe) sur l'hétérogénéité spatiale de la distribution de l'eau (coefficient de variation en ordonnées du graphe) (Yassi Elamri et al., 2018)

Des travaux de simulation et de mesures, menés par l'INRAE (Yassin Elamri et al. 2018), ont permis de considérer trois zones au sol :

1. Les zones non impactées entre les modules ;
2. Les zones abritées sous les modules qui reçoivent moins de précipitations ;
3. Les zones de bordure situées sous la zone d'écoulement de l'eau des modules, qui reçoivent des précipitations d'intensité forte.

La simulation présentée ci-dessous montre que les modules génèrent de forts contrastes de répartition de l'eau dans le sol, avec la formation d'un « bulbe » à l'aplomb du panneau, l'eau se propageant par gravité mais aussi sur les côtés par diffusion. Ces travaux montrent aussi l'impact significatif d'une stratégie de pilotage de l'orientation des modules pour gommer en partie ce contraste de répartition de l'eau.

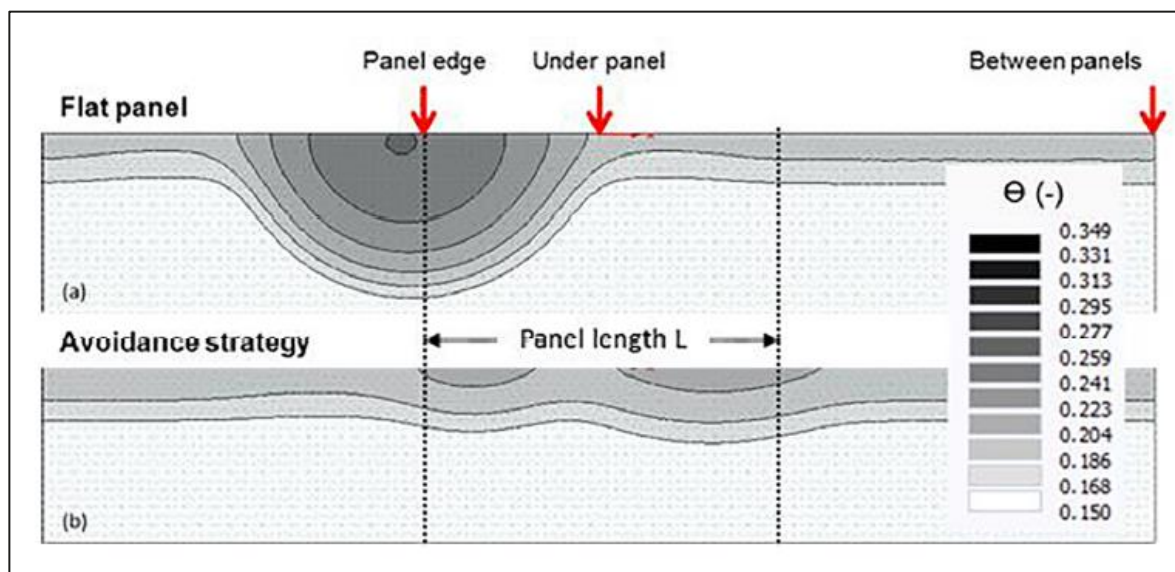


Figure 25: Simulation des schémas de répartition de l'eau dans le sol, dans trois zones et 2 configurations: panneau à plat (« flat panel » en haut de la figure) et par pilotage des modules (« avoidance strategy » au bas de la figure) pour réduire l'hétérogénéité de la pluviométrie (Yassin Elamri et al. 2018)

Il est à noter qu'à l'inverse, des travaux menés sur le microclimat d'une **centrale au sol sur prairie** pâturée au Royaume-Uni (Armstrong, Ostle, et Whitaker 2016) montrent que les précipitations sont trois fois supérieures sous les modules, alors qu'elles sont équivalentes entre les modules et sur la zone témoin. Comme précisé précédemment, ces résultats sont peut-être le résultat d'une structure photovoltaïque peu étanche à l'eau.

Des travaux chinois montrent également que la réduction de l'évaporation du sol peut aussi potentiellement permettre de limiter l'érosion en maintenant les sols humides, dans un contexte d'érosion éolienne importante (Wu et al. 2014). Soulignons ici que si l'érosion est un problème majeur en France, il s'agit plus d'érosion hydrique qu'éolienne.

D'autres travaux menés en Oregon (climat semi-aride, avec des hivers humides et des été secs) sur des centrales photovoltaïques installés sur prairie (Hassanpour Adeh, Selker, et Higgins 2018) montrent une forte hétérogénéité spatiale de l'eau dans le sol (courbes de teneur en eau du profil ci-dessous). La présence de modules réduit aussi fortement l'évapotranspiration, à tel point qu'un gain de productivité de la pâture est observé sous la centrale par rapport au témoin, allant jusqu'à 90% de productivité supplémentaire. Ces gains sont obtenus grâce à une amélioration de l'efficacité de l'usage de l'eau sous les zones ombragées. Les auteurs précisent que les pâtures semi-arides avec des hivers doux semblent être des systèmes idéaux pour maximiser les bénéfices de la présence de modules. Ces travaux doivent donc être nuancés et remis dans leur contexte géographique. Les auteurs soulignent enfin une baisse de la diversité floristique sous les modules, comme constaté par Armstrong et al. en 2016.

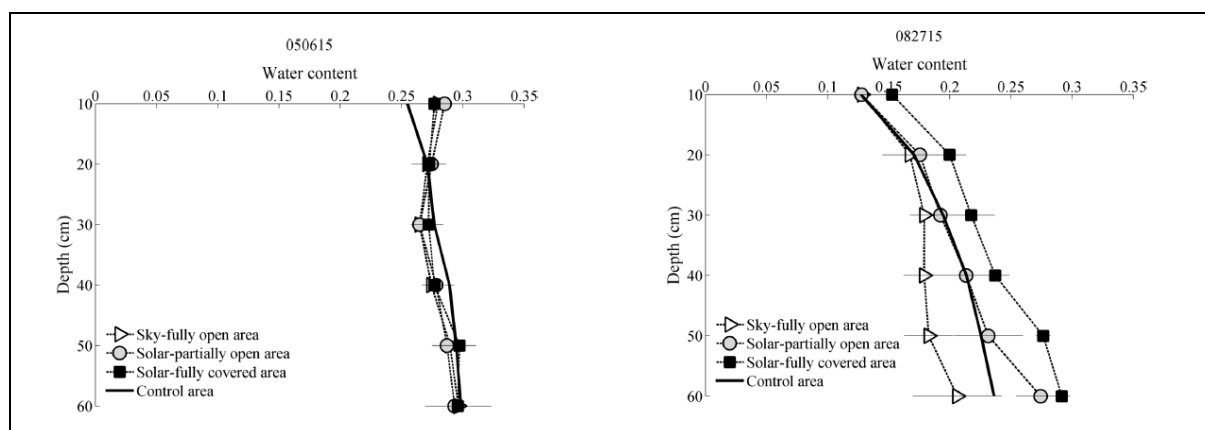


Figure 26: Teneur en eau du profil de sol selon la zone, et à deux saisons : 6 mai 2015 (gauche) et 27 août 2015 (droite)

3.3.1.5. Impacts sur le vent au niveau de la parcelle

Peu de publications relatent les impacts des structures photovoltaïques sur le vent.

Une série de mesures réalisées sur une centrale au sol sur prairie (Hassanpour Adeh, Selker, et Higgins 2018) montre que la distribution du vent serait perturbée à tous les niveaux par la présence de modules. En revanche, contrairement à ce que l'on pourrait imaginer en première supposition, les modules ne créent pas des « canyons » de vent dans un axe est-ouest entre les lignes de modules mais au contraire, orientent le vent perpendiculairement aux lignes de modules, dans la direction Sud-Nord (qui serait lié à l'augmentation locale de la température sur les modules). Il a également été constaté que la vitesse moyenne du vent au niveau du sol est légèrement augmentée dans cet essai.

Une autre expérimentation menée au Royaume-Uni (Armstrong, Ostle, et Whitaker 2016), toujours sur une centrale au sol, montre une baisse de 86% de la vitesse du vent sous les modules par rapport au témoin, et de 63% entre les modules.

3.3.2. Interactions entre la structure photovoltaïque et l'activité agricole

La combinaison de modules photovoltaïques avec une activité agricole suppose également un ajustement de la structure porteuse, tant en termes de densité qu'en terme d'agencement « morphologique » de la structure.

Pour les filières animales, il est nécessaire d'adapter la structure photovoltaïque pour qu'elle puisse être compatible avec son usage. Les considérations suivantes ont ainsi été recueillies en fonction des animaux envisagés :

- Avec les ovins : ces projets sont très courants et de nombreux projets ont été recensés. Il n'y a pas d'incompatibilité de la structure, à part un léger rehaussement des modules par rapport à une centrale classique afin de pouvoir laisser passer les animaux sous le bord inférieur de la structure.
- Avec les caprins : ces animaux ont tendance à escalader la structure et à grignoter les câbles. De fait, aucun projet n'a été recensé.
- Avec les bovins : ces animaux, de grande taille, peuvent endommager les modules. Cependant, des projets avec bovins sont à l'étude.
- Avec des volailles : la structure photovoltaïque permet de fournir de l'ombrage aux animaux. Trois installations ont été recensées, une en France, une aux Etats-Unis et une au Japon.
- Apiculture : la structure photovoltaïque met à disposition un parc fermé et sécurisé pour l'apiculteur.

Pour les filières végétales, l'itinéraire technique mobilise souvent des engins agricoles, ce qui implique les adaptations suivantes :

- Optimisation des pieux sous centrale au sol pour le passage de la faucheuse.
- Choix optimal des engins agricoles, voire renouvellement (hauteur, rayon de braquage, etc.)
- Hauteur de modules à 4 m, voire 5 m en grandes cultures pour laisser passer les tracteurs et leurs outils attelés, ainsi que la moissonneuse-batteuse.

- Largeur minimale entre les pieux pour le passage des engins, et permettre leurs manœuvres courantes (virages, demi-tour, etc.).

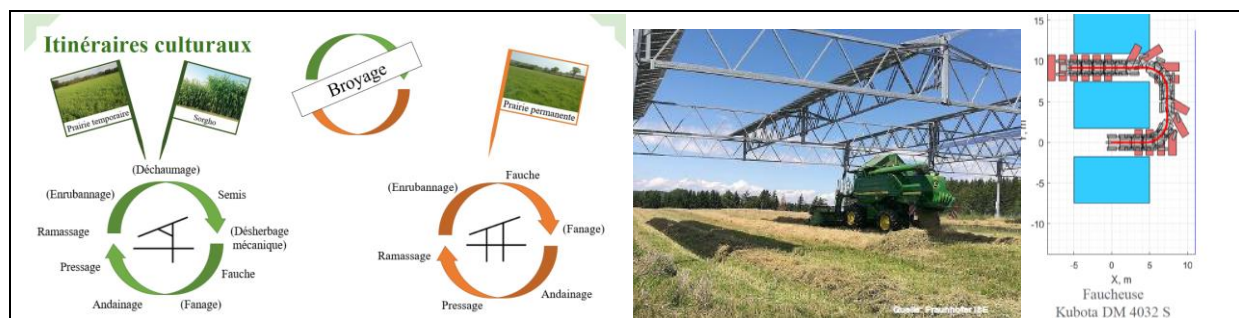


Figure 27: (de gauche à droite) exemples d'itinéraires culturaux sur prairie avec centrale au sol, récolte de blé tendre d'hiver sur les parcelles expérimentales de l'institut Fraunhofer (Trommsdorff, n.d.), exemple de trajectoire de tracteur avec faucheuse attelée dans un parc (ENDERLEN, GUILLEMEAU, et TIOLLIER 2020).

Dans le cas des fruits et légumes et de la vigne, les ombrières peuvent aussi (cf. photo ci-dessous) :

- Fournir un support d'ancrage pour des filets paragrêles.
- Fournir un support pour le tuteurage des arbres.



Figure 28: Exemple d'installations photovoltaïques adaptées pour accueillir des filets para-grêles

Enfin, l'activité agricole peut aussi impacter le rendement des modules :

- Effets négatifs sur la production électrique :
 - o le dépôt sur les modules de la poussière soulevée par les activités agricoles et les animaux est un facteur à prendre en compte dans le choix de la production et de l'itinéraire technique.
 - o Pour les serres, la forte humidité et la présence de produits phytosanitaires pourraient affecter la durée de vie des modules (Cossu et al. 2014).
- Effets positifs : la diminution de la température liée à l'évapotranspiration peut améliorer le rendement électrique. Des travaux menés en Arizona sur des cultures maraichères (tomates cerises et piments) montre une température de modules diminuée de 8,9 degrés en moyenne pendant la journée, entraînant une hausse du productible de 3 % entre mai et juillet, et de 1% de hausse en moyenne annuelle (Barron-Gafford et al. 2019).

3.3.3. Synthèse de l'impact agronomique de la présence de photovoltaïque sur des terres agricoles

3.3.3.1. Tableau récapitulatif des résultats issus des références bibliographiques

Dans le tableau suivant, les principaux résultats de rendement, disponibles dans les références bibliographiques identifiées et détaillés dans les paragraphes précédents, ont été compilés.

Pays	Type de structure, surface de la parcelle et puissance installée	Culture	Densité de modules	Impact sur le rendement et la qualité	Remarques	Source
Japon	Ombrière fixe	Maïs	nc	Hausse de 6% du rendement en semi densité, et baisse de 4% en haute densité de PV.	X 4.7 et x 8.3 de revenu généré pour semi densité et plaine densité respectivement, avec un revenu agricole représentant 22 et 12% du revenu total par m2 (coût d'investissement non pris en compte). Parcelle de 100 m2 seulement. Feed-in tariff visiblement assez haut.	Sekiyama et Nagashima 2019
France	Ombrière fixe	Blé dur	Optimale pour la production d'énergie dans le traitement à haute densité (1000 W/m2) et 52% de l'optimum dans le traitement à semi-densité	73% du rendement en grain à pleine densité de PV (LER de 1,73) et 82% à demi densité (LER de 1,35).		Dupraz et al. 2011

Pays	Type de structure, surface de la parcelle et puissance installée	Culture	Densité de modules	Impact sur le rendement et la qualité	Remarques	Source
France	Ombrière fixe	Salades et concombres	nc	Augmentation de l'humidité moyenne du sol, augmentation de la croissance en biomasse en fin de saison (+90%) et amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau (+328%).		Marrou, Dufour, et Wery 2013
Etats-Unis (Oregon)	Centrale au sol, 2,4 ha, 1,4 MW	Ovins pâturent	nc	+ 90% de biomasse sous les modules par rapport au contrôle, et 126% par rapport à la zone entre les modules.	Amélioration de l'efficacité de l'eau de 328% (zone semi-aride).	Hassanpour Adeg, Selker, et Higgins 2018
Royaume-Uni, Westmill Solar Park	Centrale au sol, 12 ha, 5 MW	Prairie permanente, Ovins pâturent	nc	Biomasse aérienne 4 fois supérieure sur le témoin et entre les modules que sous les modules. Plus faible diversité floristique sous les modules, avec une disparition des légumineuses.		Armstrong, Ostle, et Whitaker 2016
France (84)	Ombrière dynamique	Vigne	Tracking piloté (65% du rayonnement par rapport au témoin)	Pas d'impact significatif sur le rendement	Réduction de l'irrigation de 12 à 34% selon les années en volume. Amélioration des qualités organoleptiques : +13% d'anthocyanes et + 9/14% d'acidité.	CA 84, SUN'R
France (34)	Ombrière dynamique, 1720 m ² à côté d'une parcelle témoin de 1120 m ²	Maraîchage (salades)	Tracking piloté, et ombrières fixes testées à plein et demi-densité.	77-78% du rendement du témoin au printemps et 69 à 86% du rendement du témoin selon les modalités.		Y. Elamri et al. 2018

Pays	Type de structure, surface de la parcelle et puissance installée	Culture	Densité de modules	Impact sur le rendement et la qualité	Remarques	Source
France (84)	<p>Ombrière dynamique, 730m² sous dispositif</p> <ul style="list-style-type: none"> • 300m² de zone témoin • 196 modules • Structure à 4,5m du sol • 1666 pieds par hectare • Distance entre les pieds : 1,5m • Inter-rang : 4m 	Arboriculture	Tracking piloté (65% du rayonnement par rapport au témoin)	<p>Diminution du stress thermique (-4°C surface foliaire et -2°C air)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Activité photosynthèse maintenue par rapport à la zone témoin • Diminution de la contrainte hydrique : <ul style="list-style-type: none"> – Réduction de l'irrigation sous ombrage (-30%) – Statut hydrique de la plante plus favorable • Maintien de la qualité : <ul style="list-style-type: none"> – Fermeté / Couleur / Masse fraîche / Amidon / Calibre et poids / Taux de sucre inférieur (degrés BRIX) 		FORTIN 2020
Etats Unis, Université d'Arizona.	Ombrière surélevée (3,3 m du sol)	Poivrons, piments Jalapeño, tomates cerises	nc	<p>Températures plus chaudes la nuit (+0,5 °C +/-0,4) et plus fraîches le jour (+1.2 °C +/-0.3).</p> <p>Doublement de la production en poivrons et tomates sous modules, avec une amélioration de 40% de l'efficacité de l'eau pour les tomates (pas de différence avec témoin pour poivrons). Rendement équivalent au témoin pour les piments Jalapeño (différence non significative) mais efficacité de l'eau améliorée de 157%.</p> <p>Température de modules diminuée de 8,9 degrés en moyenne pendant la journée, entraînant une hausse du productible de 3 % entre mai et juillet, et 1% de hausse en moyenne annuelle.</p>	Région caractérisée par une forte radiation solaire et des températures extrêmes en été.	Barron-Gafford et al. 2019

Pays	Type de structure, surface de la parcelle et puissance installée	Culture	Densité de modules	Impact sur le rendement et la qualité	Remarques	Source
Rians, France. Vigne.	Ombrière dynamique coulissante, OMBREA.	Vigne		<ul style="list-style-type: none"> - Une température du sol systématiquement moins élevée sous ombrières pilotées : l'ombrière permet de diminuer la température du sol de 1,5 degrés à 30 cm et de 1 degré à 100 cm de profondeur pour les journées le plus chaudes (début août). - Une limitation du stress thermique : les vignes sous ombrières pilotées ont été exposées moins longtemps (réduction de - 65.4% des températures horaires) à des dépassements du seuil de 35°C, au-delà duquel l'intégrité de l'appareil photosynthétique peut être atteinte. - Un « Effet four » diminué : les valeurs horaires de déficit de pression de vapeur saturante (VPD) pouvant entraîner des modifications physiologiques (cavitation / dépérissement / mortalité) sont plus d'1,5 fois plus importante hors ombrières pilotées. - Une ouverture des stomates jusqu'à 80% plus élevée sous ombrières pilotées, qui laisse supposer un meilleur maintien de l'activité photosynthétique lors de périodes de fortes contraintes. 	<p>Pas d'effet significatif à date sur les composantes du rendement, mais comparaison délicate dans le cadre d'une année d'essai avec des rendements exceptionnellement hauts.</p> <p>Les conditions climatiques du site engendrent par ailleurs une récolte tardive (fin septembre), et ne permet pas aux raisins sous ombrière de terminer correctement leur maturation si les conditions ne sont pas optimales.</p> <p>La faible superficie de la parcelle de Rians 1 (1000m² sous ombrière) implique un échantillonnage faible et pas assez représentatif, ne</p>	Essais menés en 2019 et 2020. OMBREA, SCP, IFV, Synthèse des résultats sur la vigne à Rians Millésime 2020. 6p.

Pays	Type de structure, surface de la parcelle et puissance installée	Culture	Densité de modules	Impact sur le rendement et la qualité	Remarques	Source
					gommant pas assez les effets d'hétérogénéité du sol ; la thermodynamisme des fluides chauds (masses d'air chauds de la partie hors ombrière vers ombrière) diminue en outre les effets protecteurs de l'ombrière.	
France, station horticole du SCRADH, CA 83 et Ombrea. (Projet PIVEAU, Hyères)	Ombrière dynamique (système de panneaux coulissants OMBREA)	Pivoines	500m2 d'ombrières sur un site de 1000m2 pour site 1. 2600 m2 d'ombrières sur un site de 1250m2 pour site 2.	La qualité des fleurs a été améliorée sous les modules coulissants dynamiques : augmentation de 17% de la qualité des fleurs, grâce à de meilleures conditions climatiques durant la saison végétative, et une meilleure vernalisation pendant l'hiver (somme de températures froides atteinte). Les conditions pédoclimatiques sous le système dynamique ont clairement été modifiées, avec en particulier : <ul style="list-style-type: none"> - Température du sol plus faible en hiver (besoin de vernalisation de la pivoine) - Baisse de 6 degrés en moyenne de la température du sol en période chaude. 	Zone méditerranéenne, historiquement productrice de fleurs mais sensible au changement climatique.	Chuste P.A., Coutant J., s.d.

Pays	Type de structure, surface de la parcelle et puissance installée	Culture	Densité de modules	Impact sur le rendement et la qualité	Remarques	Source
				<ul style="list-style-type: none"> - Diminution de 34% de la durée de la période de stress thermique des pivoines. - Diminution significative de la lumière excessive à l'origine de photo-inhibition. <p>+ 27% de besoin en eau sur la partie témoin.</p>		
Fraunhofer Pilot Plant (Resola)	Ombrière, 0.3 ha, 194 kWc -30% de radiations par rapport au témoin.	Grandes cultures : trèfle, céleri, pommes de terre, blé tendre.	- 30% de radiation par rapport au témoin	<p>Blé : déclin de 19% du rendement en 2017 et hausse de 2,7% en 2018. Pommes de terre : déclin du rendement de 18% en 2017 et hausse de 11% en 2018. Trèfle : - 5% de biomasse en 2017 et - 7% en 2018. Céleri : -17% en 2017 et + 12% en 2018</p> <p>➔ Essais qui montrent bien la variabilité inter-annuelle et donc la nécessité de disposer de séries temporelles suffisamment longues pour réaliser des bilans.</p>	<p>L'été sec et chaud de 2018 a fortement favorisé l'effet de l'ombrage.</p> <p>Les effets bordures semblent importants sur cette installation.</p>	Trommsdorff et al. 2020.
Université de Sassari, Italie	Serre PV (50% de la surface de toiture en PV, soit 64% de radiation solaire en moins), éclairage artificiel avec de l'autoconsommation du PV. 0.96 ha 68 kWp	Tomates hors sol	50% de la surface en PV	<p>Baisse du rendement de moitié par rapport à une serre plastique, et seulement 18% en bordure.</p> <p>La température moyenne observée durant les mois les plus froids était en-dessous du seuil minimum sous serre (environ 12°C) : facteur limitant pour la maturation des fruits (nov-janv)</p>	Revenu de la hausse de rendement liées à la supplémentation de lumière et de chaleur par autoconsommation inférieure au coût du dispositif d'éclairage et de chauffage.	Cossu et al. 2014

Pays	Type de structure, surface de la parcelle et puissance installée	Culture	Densité de modules	Impact sur le rendement et la qualité	Remarques	Source
					Les rangées de tomates sous toit photovoltaïque ont été pénalisées principalement dans le cycle de nov-janv en raison de l'indice de précocité plus bas et une tendance des prix plus favorable en milieu de récolte. Finalement le revenu provenant de l'électricité photovoltaïque est supérieur au revenu de la production agricole, puisque les rendements sont fortement impactés du fait de l'ombrage des modules.	
Université de Milan, Italie	Serre PV	Tomates hors sol	nc	Baisse de rendement de 20% en milieu de saison (juin-Aout) et baisse >50% en pré et post saison. Baisse de 21% des sucres totaux dans les tomates. Les résultats montrent sous serre photovoltaïque une réduction significative de la température (environ - 2° en mars-mai) et du rayonnement solaire global (moins de la moitié). La production de tomates a quant à elle été	Comparaison entre une production de tomates hors-sol sous une serre classique blanchie entre juin et septembre et une même production sous serre avec modules photovoltaïques sur la	Bulgari et al. 2015

Pays	Type de structure, surface de la parcelle et puissance installée	Culture	Densité de modules	Impact sur le rendement et la qualité	Remarques	Source
				réduite quantitativement et qualitativement (cf. tableaux ci-dessous) : une faible teneur en lycopène (responsable de la couleur rouge du fruit), en β -Carotène (autre pigment) et en sucres totaux.	moitié sud de la toiture	
Suivi CA 47	Serre PV		nc	<p>2014 : En comparaison à des résultats moyens d'itinéraires techniques du même genre (type de plants, variétés, mode de production), les rendements sont impactés d'environ :</p> <ul style="list-style-type: none"> • -35% en Gariguette, • -65% en Ciflorette, • -55% en Rondes. <p>2016 (3ème année de test, pas de résultats en 2015) : 2 variétés ont été retenues. 10% de Ciflorette en chapelle de bordure (plus ensoleillée) et 90% de Gariguette pour la surface restante. Le nombre de fleurs/fruits est conforme aux moyennes et assure le compromis pour atteindre des rendements convenables : le rendement en Gariguette sous modules est équivalent au rendement moyen départemental. Résultats encourageants.</p>	<p>Absence de témoin. Comparaison aux résultats départementaux.</p> <p>15 jours des stades phénologiques entre les plantes cultivées en bordure et celles au centre de la chapelle. Nombreux biais rapportés : gestion phytosanitaire, hétérogénéité de grosseurs des plants. Cela rend difficile l'identification de l'impact réel des modules sur le rendement.</p>	CA 47

Tableau 13 : Synthèse de l'impact sur la quantité et la qualité des productions agricoles de la présence de PV sur des terres agricoles

3.3.3.2. Conclusions

Globalement, les résultats issus de la bibliographie scientifiques sont très hétérogènes et difficilement comparables, avec une forte disparité géographique limitant la possibilité de comparaison et d'extrapolation des résultats. Quant aux articles de presse, ils sont ambigus et manquent d'éléments chiffrés⁹.

On peut cependant observer des contextes pédoclimatiques qui sembleraient plus favorables pour ce type d'installation et à l'inverse des contextes pour lesquels les installations sont fortement impactantes.

Il convient aussi de prendre en compte le fait que pour les expérimentations menées sur ombrières, les installations sont de petite taille, impliquant des « effets de bords importants » (cf. photo ci-après) qui n'existeraient pas sur des installations commerciales. Les effets microclimatiques sont aussi largement minimisés (modification de la température, du vent et l'humidité) sur des prototypes de taille réduite. Il serait par exemple impossible d'imiter les effets liés à des structures de grande taille, car si la surface est petite, le rayonnement, en début et fin de journée, au sol à l'aplomb du centre de la structure n'est que peu impacté contrairement à une situation avec une structure de plus grande taille.



Figure 29 : Site expérimental de l'institut Fraunhofer en Allemagne. La taille de la structure suggère d'important effets de bords, comme sur la majorité des sites expérimentaux étudiés et recensés dans ce rapport.

De façon générale, soit les essais sont réalisés sur des sites exploités commercialement à « échelle réelle » mais il n'y a pas de zone témoin, soit il s'agit de sites expérimentaux avec zone témoin mais avec des effets de bords potentiels. Ce constat est moins vrai pour les mesures sur centrales au sol avec pâture, pour lesquelles il est souvent assez facile de créer une zone de pâture témoin dans la parcelle adjacente.

L'étude bibliographique montre aussi que les modélisations de productions agricoles, élaborées à ce jour, sont difficilement capables de prédire la productivité des cultures soumises à des alternances de lumière/ombre, comme souligné par Fatnassi et al. (2015).

Le manque de retours expérimentaux sur des séries pluriannuelles est aussi une limite pour l'interprétation des résultats, surtout en période de changement climatique qui induit et induira plus d'hétérogénéité climatique, et probablement, d'hétérogénéité de la productivité des productions sous modules.

L'ombrage d'une année peut aussi entraîner des répercussions (positives ou négatives) sur les performances des années suivantes. Ceci est particulièrement vrai en production pérenne comme en arboriculture, en viticulture, mais aussi pour les cultures pluriannuelles comme les asperges. Par exemple, des producteurs d'asperges sous serres photovoltaïques de type Venlo (Landes et Pyrénées-Orientales) témoignent de croissance ralentie voire limitée, du fait du manque de lumière. L'asperge qui produit ses turions (bourgeons en partie souterraine) à partir de réserves nutritionnelles stockées dans ses griffes l'année précédente, s'accommode difficilement de cette situation. L'ombre est particulièrement importante en début d'année. La production sous serre démarre donc avec des petits volumes de

⁹ Les articles de presse ont été très utiles pour réaliser un recensement des installations existantes et obtenir des éléments de description (type de production agricole, surface, puissance installée, etc.). En revanche, il n'y a jamais de retour sur les rendements et l'information dispensée, peu robuste scientifiquement, ne peut alimenter la compilation de données scientifiques effectuée dans ce rapport.

production. Selon les exploitants agricoles il est nécessaire d'attendre la 4^{ème} année pour obtenir des niveaux de production comparables à de l'asperge de plein champ (Réussir fruits & légumes | FLD 2015).

Ces constats soulignent donc la nécessité de bénéficier de séries pluriannuelles de mesures, afin de ne pas minimiser l'impact de la présence de modules sur la croissance et la productivité des cultures pluriannuelles et pérennes.

Malgré la nécessité de consolider et renforcer la base de savoir existante, l'analyse bibliographique montre que les rendements obtenus sont très souvent altérés par la présence de modules photovoltaïques, avec quelques exceptions pour des densités de modules faibles. L'analyse des résultats d'expérimentation montre aussi que la durée de végétation et de fructification est aussi diminuée, alors que c'est souvent en début ou fin de saison que les prix peuvent être les plus intéressants.

Concernant les serres, les retours sont très hétérogènes et difficiles à interpréter car dépendants des géométries de serres, pas toujours construites pour optimiser la production agricole. Il convient encore d'optimiser leur conception en termes de design, de densité et de transparence des modules : toutes ces variables ayant des effets sur le rendement photovoltaïque et les composantes du climat interne de la serre. Il s'agit aussi de sélectionner des plantes adaptées à ce système particulier de production et, d'éventuellement, revoir à la baisse l'intensité habituelle de la production sous serre pour l'adapter à des conditions d'ombrage limitantes.

Enfin, les baisses de rendement constatées poussent à s'interroger sur la pertinence des systèmes alliant énergie photovoltaïque et agriculture : une baisse de productivité pourrait-elle être acceptable (en contrepartie d'autres impacts positifs) ?

Pour mesurer la performance de ces systèmes à l'hectare, un indicateur courant est le LER (« *Land Equivalent Ratio* »), hérité de l'agroforesterie. Le LER, pour une unité de surface, se calcule comme suit :

$$LER = \frac{\text{Rendement de la culture sous PV}}{\text{Rendement de la culture sans PV}} + \frac{\text{Rendement électrique en PV avec agriculture}}{\text{Rendement électrique sans agriculture}}$$

Si le LER est supérieur à 1, alors la combinaison du photovoltaïque sur terres agricoles est plus efficace que la somme d'un hectare de culture et d'un hectare de modules photovoltaïques, pris séparément. En général, l'association de cultures produit des LER allant de 1 à 1,3, et l'agroforesterie de 1,1 à 1,5 (Dupraz et al. 2011). Un LER supérieur à 1 traduit en fait une meilleure valorisation des ressources disponibles sur une surface donnée, et notamment la lumière.

Pour le photovoltaïque associé à des cultures, le LER est souvent supérieur à 1. Des travaux menés à l'INRA de Montpellier soulignent que quelle que soit la saison ou le type de couverture de modules, le LER est supérieur à 1.

Table 7
Land Equivalent Ratios (LER) for the three artificial shading conditions (ST, HD and CT) in comparison with CP, for the spring and summer cropping cycles of lettuces. LER values were calculated from agricultural yields obtained at the final harvest date. Photovoltaic productions were estimated from the AVstudio model, comparing the tested devices (ST, HD and CT) with a standard photovoltaic installation of equivalent coverage rate (60%) and technology (fixed panels for HD, tracking-1 axis for ST and CT). Letters in parentheses indicate significant differences in biomass (Wilcoxon test - error risk 5%).

	Spring				Summer			
	ST	CT	HD	CP	ST	CT	HD	CP
Relative agricultural production (-)	0.77	0.77	0.78	1.00	0.86	0.82	0.69	1.00
Relative electricity production (-)	0.50	0.30	0.50	0	0.50	0.27	0.50	0
LER (-)	1.27 (a)	1.07 (ab)	1.28 (a)	1.00 (b)	1.36 (a)	1.09 (c)	1.19 (b)	1.00 (d)

Tableau 14: LER pour 3 conditions d'ombrage contrastées et comparées à une situation témoin (Yassin Elamri et al., 2018)

Le tableau ci-dessus montre aussi que le LER tend à augmenter avec la couverture de panneau, car la baisse de rendement n'est pas linéairement corrélée avec l'emprise des modules (capacité d'adaptation de la plante et caractère multifactoriel du rendement, notamment au regard de l'efficacité de l'eau). **Cela induit la limite suivante dans le LER : plus la part de modules est augmentée, plus le LER tend à augmenter, au détriment d'une stratégie qui s'intéresserait à une optimisation de la production agricole sous modules.**

L'indicateur LER ne permet pas non plus de prendre en compte l'hétérogénéité de la production sous les modules, véritable casse-tête pour la gestion de la culture et sa récolte. Il n'intègre pas non plus le décalage de maturité qui peut conduire à perdre des marchés. Il n'inclue pas non plus la pertinence des modules pour protéger les cultures en situation de stress hydrique, ce qui permettrait de discriminer les systèmes où l'intégration de modules photovoltaïques dans les systèmes agricoles pourrait être un moyen de diminuer l'impact des sécheresses ou de la chaleur dans un contexte de changement climatique. Enfin, si l'on se place du côté de l'exploitant agricole, le LER n'est pas représentatif car l'exploitant ne peut, de toute façon pas, disposer d'une surface uniquement photovoltaïque sur ses parcelles. Pour lui, seule la surface agricole est à prendre en compte, ce qui, potentiellement induit donc une dégradation de ses ressources. **Ce constat pousse donc à réfléchir à un indicateur plus complet qui permettrait de pondérer le LER par ces éléments d'hétérogénéité de rendement, de maturité et d'efficacité d'utilisation de la ressource en eau, tout en tenant compte des intérêts des acteurs agricoles.** Nous avons pris connaissance de travaux à ce sujet, en cours à l'IRSTEA de Montpellier, mais ils ne sont pas encore publiés.

Enfin, bien qu'une baisse de rendement soit fréquemment observée, la présence de modules semble toutefois permettre, sous certaines conditions de cultures, de climat et de taux d'emprise au sol, des rendements proches du témoin et permettant parfois une économie de la ressource en eau. Ce constat est particulièrement vrai dans les régions sèches, comme rapporté dans les paragraphes précédents pour des pâtures en climat semi-aride de l'Oregon ou des conditions méditerranéennes près de Montpellier. Ces résultats positifs semblent toutefois atteints grâce à un ajustement de l'ombrage à semi-densité et un effacement partiel des modules aux heures de plein soleil, du moins pour les productions de fruits et légumes sous ombrières.

Soulignons que le changement climatique entraînera probablement une augmentation de l'occurrence des « années blanches », qui correspondent à des destructions totales de récoltes (grêle, températures extrêmes, gels tardifs faisant suite à une reprise précoce de végétation, tempêtes, etc.). Cette problématique est particulièrement vraie en viticulture et en arboriculture, et le photovoltaïque peut potentiellement venir contribuer au panel de solutions permettant de diminuer la fréquence de ces années blanches.

Enfin, notons que les impacts sur l'économie de l'exploitation sont très peu mentionnés dans les travaux référencés, qui s'attachent préférentiellement aux impacts agronomiques¹⁰.

¹⁰ L'enquête prévue en phase 3 devrait aider à combler ce manque.

3.4. Effets environnementaux du photovoltaïque sur terrains agricoles

De nombreuses études portent sur les aspects environnementaux du photovoltaïque de manière générale, mais peu sur le périmètre précis du photovoltaïque sur terrains agricoles et encore moins sur les spécificités de ce contexte. Néanmoins, certains impacts identifiés semblent présenter des enjeux spécifiques au contexte des terrains agricoles.

Hernandez et al. (2014) ont réalisé une revue des impacts des centrales photovoltaïques sur l'environnement : la biodiversité, la consommation d'eau, l'érosion des sols, la qualité de l'air et la santé humaine, sur l'usage des sols, sur le changement climatique. Le cadre général de l'évaluation des impacts est présenté dans la figure ci-dessous.

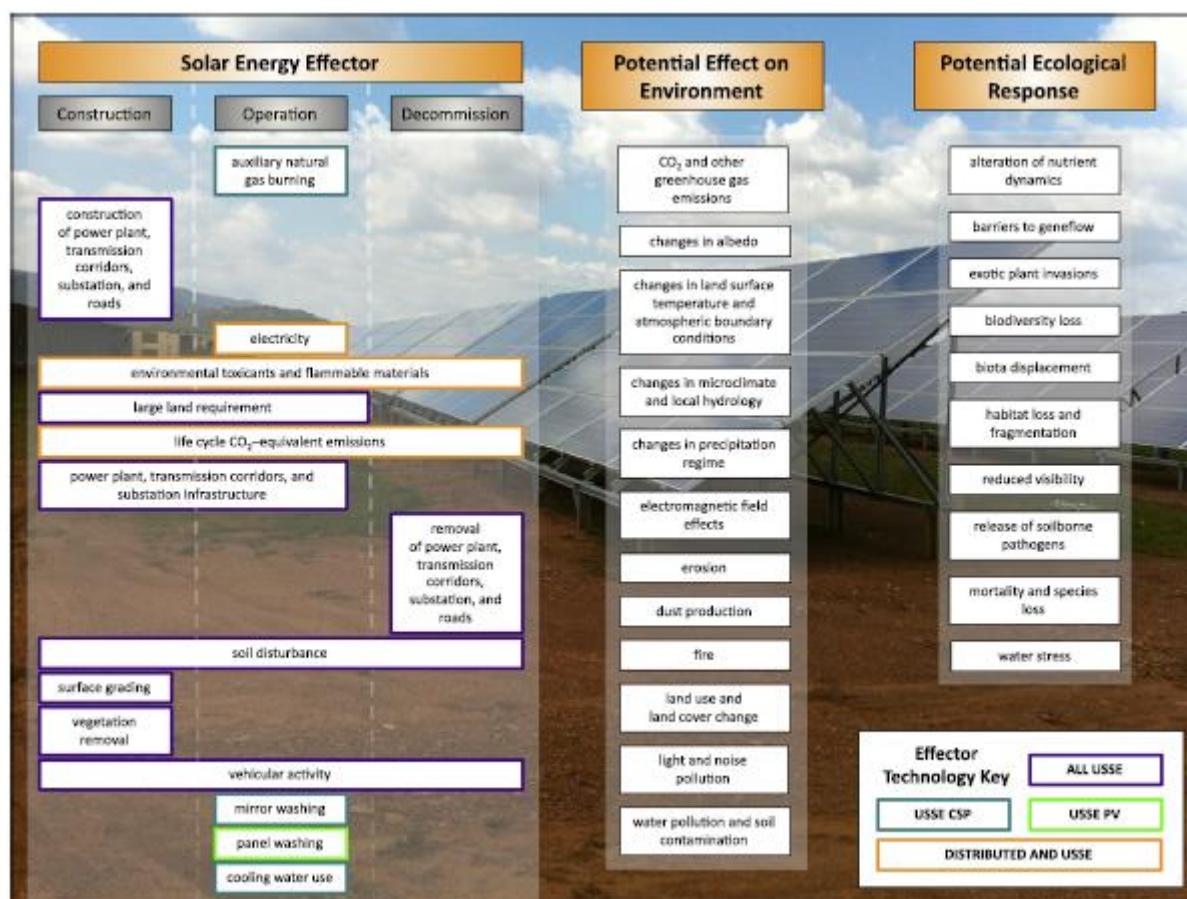


Figure 30 : Effets des centrales solaires (ALLUSSE) incluant les installations à concentration solaire (USSECSP) et PV (USSEPV) pour la production et la distribution

Ce cadre rappelle que des impacts sur l'environnement ont lieu aux différentes phases de la vie de la centrale photovoltaïque : à l'installation, pendant la période de fonctionnement et au démantèlement. Une approche sur l'ensemble du cycle de vie intégrerait en plus les impacts amonts, liés à la production des matières premières, la production des modules, au transport, ainsi que les impacts aval, liés à la gestion de la fin de vie des déchets.

Ces effets environnementaux concernent de nombreux volets :

- Le climat :
 - o La production d'électricité à partir de photovoltaïque permet la réduction des émissions de gaz à effets par rapport à la production d'électricité à partir d'énergies fossiles. Le niveau de ces émissions évolue vite pour le photovoltaïque avec les progrès technologiques de ces dernières années. Sur l'ensemble du cycle de vie, le photovoltaïque émettrait entre 14 et 45 gCO₂eq/kWh (Hsu DD et al., 2012 ; Kim et al., 2012) contre 24 pour le nucléaire et près de 1000 pour le charbon (Varun et al., 2009).
 - o L'installation de modules impacte la végétation située en dessous quand elle n'a pas été détruite, et le stockage de carbone par cette biomasse. Ce stockage est fortement dépendant du changement de végétation induit par l'installation et des changements de rendement biomasse. Cet effet est négatif, en particulier, lorsque l'installation a nécessité un défrichement d'une forêt. Il peut être positif si la présence des modules permet une production de biomasse ou augmente ses rendements.
 - o Les installations photovoltaïques induisent des modifications de l'albedo des surfaces des milieux sur lesquelles elles sont implantées. L'albedo des modules se situe entre 0,18 et 0,23, là où celui de villes est compris entre 0,15 et 0,22 (Hernandez et al., 2014), celui des prairies est compris entre 0,15 et 0,30, du sable près de 0,35 (MétéoFrance¹¹). Par exemple, Millstein and Menon (2011) ont montré un réchauffement de 0,4°C localement causé par une installation dans le désert de Mojave.
 - o Les installations peuvent aussi modifier la circulation d'air, et ainsi la température localement. Cet effet dépend beaucoup du contexte d'implantation, dans un contexte urbain il est négligeable, dans un contexte de milieu ouvert il est significatif, ce qui est souvent le cas des terres agricoles. Au sol, la température est néanmoins généralement diminuée par l'ombrage généré par les modules (cf. §3.3.1.2)
- Le sol :
 - o Les sols sont susceptibles d'être dégradés en particulier pendant la phase chantier. Ils peuvent subir des tassements liés aux passages d'engins de chantier, de l'érosion et de la perte de matière organique accentuée par l'éventuelle mise à nu des sols et par la manipulation de la terre pendant l'installation. La modification des régimes de pluies et de vent peut également avoir un effet sur l'érosion des sols.
 - o L'installation du PV sur terrains agricoles pourrait être considérée comme artificialisant les sols, en fonction de la configuration de la structure PV : types de pieux, espacements, densité... Pour une serre PV, son installation est généralement considérée comme imperméabilisant les sols même si cette imperméabilisation est relativement réversible.
 - o Pour autant, suite à l'adoption le 28 juin 2021 de plusieurs amendements, une disposition du projet de loi climat stipule qu'«un espace naturel ou agricole occupé par une installation de production d'énergie photovoltaïque n'est pas comptabilisé dans la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers. ». Le texte indique que les installations photovoltaïques ne doivent pas affecter durablement les fonctions écologiques du sol. Suite à l'adoption d'un sous-amendement, il précise aussi que ces installations ne doivent pas être incompatibles avec l'exercice d'une activité agricole ou pastorale. Les modalités de mise en œuvre de ces dispositions devront être précisées par décret en Conseil d'État.
- L'eau : La présence des modules photovoltaïques modifie les régimes d'évapotranspiration et de pluies (cf. §3.3.1.3 et §3.3.1.4). De manière générale, les modules augmentent l'hétérogénéité spatiale au sol de l'eau reçue ou perdue. Ils ont tendance à limiter l'évapotranspiration et à

¹¹ <http://www.meteofrance.fr/publications/glossaire/149322-albedo>

concentrer l'eau reçue en bas des modules. Ils peuvent ainsi engendrer des ruissellements (pouvant éroder les sols).

- La biodiversité :
 - o Si, pour certaines filières d'énergies renouvelables, leurs impacts sur les taxons potentiellement les plus sensibles aux modifications de leurs biotopes ou habitats ont fait l'objet de plusieurs études scientifiques de référence (par exemple, l'impact de l'éolien terrestre sur les oiseaux et les chauves-souris ou l'impact de l'hydroélectricité sur les espèces aquatiques), ces questions sont nouvelles pour la filière photovoltaïque. Pourtant, ces dernières années, de plus en plus de projets de développement de centrales photovoltaïques ont permis de commencer à analyser leurs impacts potentiels sur la biodiversité (espèces végétales, microfaune, macrofaune, etc.).
 - o La littérature ne livre cependant encore que trop peu d'enseignement robustes, en raison de la difficulté à accéder à des données scientifiquement robustes et exhaustives, prenant en compte notamment la situation initiale de l'écosystème avant l'installation des centrales ainsi que l'évolution des cortèges d'espèces végétales et animales sur le long terme. Ainsi, les résultats d'études concluant à de potentiels effets « positifs » pour la biodiversité ont été relativisés par des experts scientifiques qui soulèvent le besoin de diligenter des études spécifiques complètes, comparant notamment les composantes et fonctions physiques, bio-géochimiques et biologiques évaluées au sein des parcs photovoltaïques, à ces mêmes composantes au sein de sites témoins. D'autres impacts liés aux dispositifs ou activités nécessaires à l'installation ou l'exploitation des centrales ont également été analysés (incidences des clôtures, des panneaux photovoltaïques, des pistes de circulation des engins...).
 - o Dans la littérature, on peut notamment citer le projet « Processus d'Intégration Ecologique de l'Energie Solaire » (PIESO), publié en 2020, qui propose un guide technique (Vellot, Cluchier, et Illac 2020) et une boîte à outil (Kaldonski et al. 2020) d'aide à l'écoconception et à l'intégration écologique des systèmes photovoltaïques. Une étude a été publiée en 2020 (I Care & Consult et Biotope, 2020), visant à mesurer l'impact des centrales photovoltaïques au sol sur différentes composantes de la biodiversité sur la base de 316 documents se rapportant à 111 parcs photovoltaïques. De plus, plusieurs synthèses bibliographiques portant sur les impacts des parcs photovoltaïques sur la biodiversité sont également en cours de finalisation (FNE - photoscope, LPO). Enfin, différents groupes de réflexions sur le sujet « biodiversité et énergies renouvelables » sont en cours de mise en œuvre à l'échelle nationale (UICN France, Orée, WWF, FNE, etc.).
- La santé humaine :
 - o En lien avec l'érosion des sols, des particules fines avec leurs contaminants peuvent être émises, lors de la phase chantier.
 - o Des retours d'entretiens indiquent que la gestion de la fin de vie des modules est cruciale pour éviter la dispersion d'éléments potentiellement toxiques dans l'environnement.

En France, en général, l'installation de centrales photovoltaïques sur terrains agricoles est associée à la mise en œuvre de pratiques agricoles respectueuses de l'environnement, voire la mise en œuvre d'une agriculture biologique suscitée par la réalisation des études d'impacts et études préalables. Par exemple, la gestion du désherbage dans le cadre d'une centrale au sol ne peut se faire par l'usage de produits phytosanitaires, qui sont interdits. Il peut alors être réalisé par le pâturage d'animaux, des ovins généralement. Dans ce cas, le chargement (nombre d'animaux à l'hectare) est particulièrement étudié. Ces dispositions suggèrent des effets positifs sur la qualité de l'eau et sur la biodiversité des centrales au sol. De plus, l'installation de ces centrales peut également être associée à un changement de productions végétales pouvant amener un stockage supérieur de carbone dans les sols.

4. Cadre du développement du photovoltaïque sur terrains agricoles en France

4.1. Mécanismes de soutien à l'énergie photovoltaïque

4.1.1. Historique du dispositif de soutien

Dans le contexte de prise de conscience environnementale qui a suivi la signature de l'accord de Kyoto, le photovoltaïque a été identifié comme une des solutions pour décarboner le secteur électrique. Or, dans le début des années 2000, le coût de l'électricité photovoltaïque était encore élevé par rapport aux filières électriques existantes, plus mûres technologiquement. Les Etats ont donc mis en place des mécanismes de soutien économiques permettant aux projets photovoltaïques de devenir rentables, encourageant ainsi les investissements dans ce secteur afin d'atteindre les objectifs énergétiques nationaux. Ces mécanismes de soutien permettent également d'augmenter la demande pour cette technologie et de réduire *in fine* le coût de production par effet d'échelle et atteindre plus vite la parité réseau¹².

En France, la loi du 10 février 2000 instaure le principe de l'obligation d'achat et des arrêtés fixent le niveau de tarif d'achat et ses conditions d'éligibilité. Le premier arrêté date de l'année 2002, le tarif a été fixé à 15 c€/kWh sans différence entre les systèmes au sol ou en toiture. Ce tarif est considéré faible par rapport au coût de production, ce qui se traduit par des volumes installés limités (< 3 MW en 2005¹³).

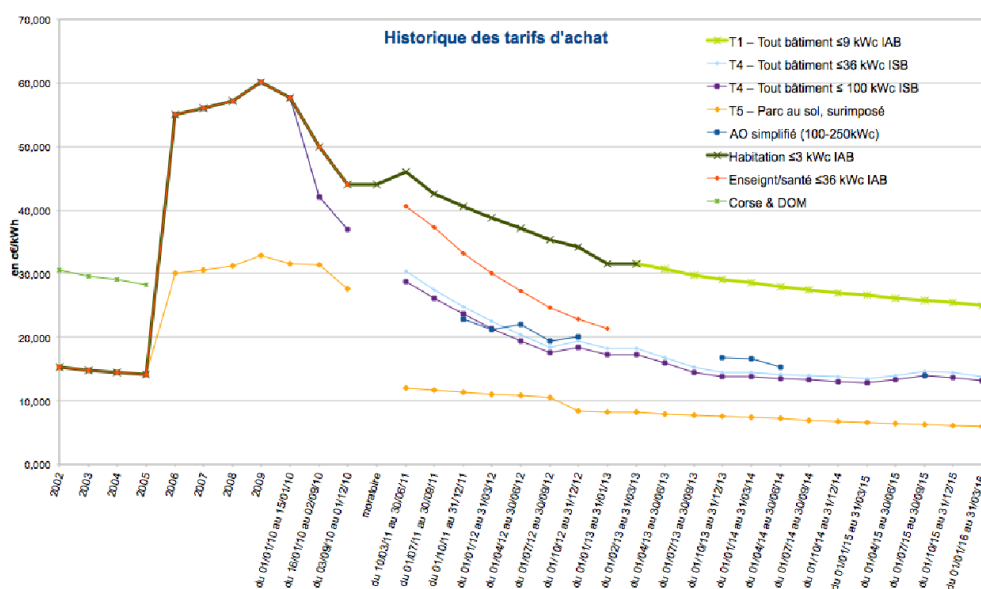


Figure 31: Evolution des tarifs d'achats photovoltaïque en France jusqu'en 2016, source : photovoltaïque.info

En 2006, l'Etat français augmente les tarifs d'achat pour permettre un décollage de la filière photovoltaïque en France, notamment pour les systèmes intégrés au bâtiment (c'est-à-dire, remplaçant des produits de construction dans l'enveloppe du bâtiment). Cependant, le niveau du tarif est trop important par rapport au coût d'installation, il atteint 602 €/MWh en 2009 avec la prime « intégré au bâtiment » et hors aides régionales et fiscales. Cette hausse, combinée avec une baisse importante du coût des modules photovoltaïques, s'est traduite par une augmentation incontrôlable des volumes

¹² Le rapport des États généraux du solaire photovoltaïque (octobre 2011) définit le concept de la parité réseau : Pour les installations où l'électricité solaire peut-être consommée sur place, la parité réseau est atteinte quand le coût de production du kWh photovoltaïque est équivalent au coût d'achat de l'électricité au détail. Pour les parcs au sol de grandes tailles, la parité réseau se mesure à la compétitivité de l'électricité solaire vis-à-vis du prix de gros de l'électricité.

¹³ Données CRE sur installations raccordées en 2014

installées et à ce qu'on a appelé la « bulle spéculative solaire ». Cet emballement a été constaté sur tout type de centrales, allant des petites aux grandes toitures ainsi qu'aux centrales au sol. Dans cette période, de nombreuses serres photovoltaïques ont également été érigées ayant pour seul but de produire de l'électricité car les modules photovoltaïques sur serres étaient alors considérés comme de l'intégration au bâtiment. Cette éligibilité a ainsi permis aux développeurs de projets de bénéficier de tarifs d'achat extrêmement avantageux. Ces serres, sans vocation agricole, sont appelées aujourd'hui, les serres « alibis ».

Suite à la bulle spéculative, l'Etat a décrété un moratoire sur le tarif d'achat en 2010 avant de revoir à la baisse les tarifs d'achat, tenant compte d'une dégressivité plus importante, liée au volume de raccordement et à l'évolution du coût de production. De plus, des appels d'offres ont été mis en place pour les centrales au sol et les grandes toitures, permettant ainsi à l'Etat de mieux gérer les coûts et les volumes installés.

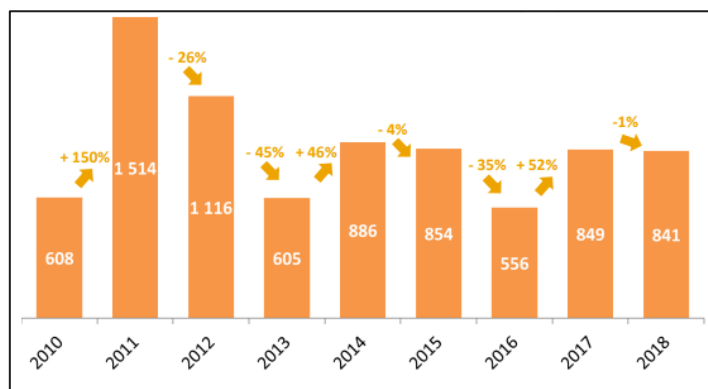


Figure 32: Evolution du flux annuel d'installations raccordés au réseau en MW/an. La période d'emballement est illustrée à travers le volume record de raccordement de 2011. Source: Observeatoire énergie photovoltaïque

La période de stabilité réglementaire, de 2011 à 2016, est marquée par une restructuration du secteur et l'émergence d'acteurs spécialisés dans le développement de projets photovoltaïques de tailles importantes. La croissance des volumes raccordés est principalement portée par les centrales au sol et les grandes toitures (70% des 4GW de croissance entre 2011 et 2016).

En 2016, de nouveaux changements réglementaires sont mis en place : le tarif d'achat est limité aux installations < 100 kWc, et les grandes centrales au sol et en toitures sont exclusivement sélectionnées par appels d'offre avec complément de rémunération. Les volumes des appels d'offres ont également été revus à la hausse.

Depuis 2016, la filière photovoltaïque se consolide avec l'acquisition, par les grands énergéticiens, des développeurs spécialisés. La concurrence sur les appels d'offres fait rapidement baisser les tarifs. En 2018, le tarif moyen des centrales au sol, lauréates de l'appel d'offre sur le 5ème période, atteint 5,5 c€/kWh.

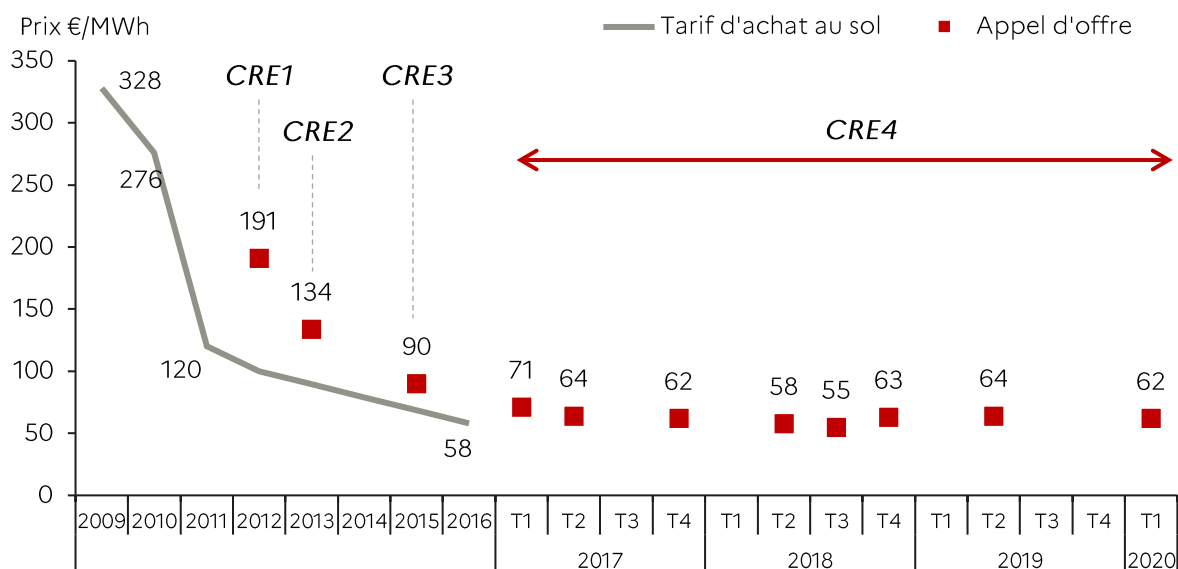


Figure 33 : Evolution des prix moyen pondérés des dossiers retenus dans les appels d'offres CRE, source : analyse I Care d'après les résultats des appels d'offres CRE

De plus, certaines centrales photovoltaïques deviennent désormais rentables sans mécanisme de soutien. Ainsi, un nouveau schéma de valorisation apparaît, le *Power Purchase Agreement* (PPA), ou « Contrat d'achat d'électricité » en Français. Il s'agit d'un contrat de vente à long terme entre un producteur photovoltaïque et un acheteur consommateur ou fournisseur d'électricité. La particularité de ce contrat est qu'il n'est pas encadré par l'Etat, les 2 parties négocient les conditions librement, notamment le prix de l'électricité et la durée du contrat. Le premier « *corporate PPA* », contrat direct entre un producteur et un consommateur, a été signé en 2019 entre le développeur Voltalia et la société Boulanger pour une capacité de 5 MW et une durée de 25 ans.

4.1.2. Dispositif de soutien actuel

Pour permettre le développement de son projet et obtenir une rentabilité économique, le développeur/exploitant d'un système photovoltaïque doit pouvoir valoriser l'électricité produite par son système. Si son prix de production est suffisamment bas pour concurrencer d'autres technologies de production d'électricité, il pourra vendre sa production sur le marché de gros de l'électricité ou via un contrat de gré-à-gré. Mais généralement, il cherchera à bénéficier des mécanismes de soutien financiers de l'Etat.

Un producteur peut ainsi bénéficier de l'un des deux dispositifs de soutien suivants :

- Un tarif d'achat : un acheteur obligé, EDF ou une entreprise locale de distribution, est obligé d'acheter l'énergie photovoltaïque au producteur à un prix fixé.
- Un complément de rémunération : l'électricité photovoltaïque produite est vendue sur le marché de l'électricité et l'Etat verse au producteur un complément de rémunération si ce prix de vente s'avérait plus bas que le prix de référence établi par le développeur pour garantir la rentabilité de son installation.

Pour sélectionner les producteurs photovoltaïques qui auront le droit à l'un de ces deux dispositifs de soutien, l'Etat dispose de deux mécanismes d'octroi¹⁴ :

- Le guichet ouvert

Il ouvre le droit à bénéficier d'un tarif d'achat pour toute installation éligible. A ce jour, seules les installations photovoltaïques sur toiture de puissance inférieure ou égale à 100 kWc sont éligibles.

¹⁴ Suite à des annonces gouvernementales, il est à noter que l'arrêté tarifaire devrait être élargi à toute installation photovoltaïque de puissance inférieure à 500 kW. En conséquence, les appels d'offres devraient être réservés aux installations de puissance supérieures ou égales à 500 kW.

Les arrêtés tarifaires en vigueur sont celui du 9 mai 2017 pour la France métropolitaine et celui du 7 mai 2017 pour les zones non-interconnectées.

En ce qui concerne le monde agricole, deux types d'installations peuvent bénéficier d'un tarif d'achat en guichet ouvert : **les bâtiments agricoles (ex : hangars) et les serres**. En effet, selon la note d'instruction de la DGEC sur les modalités d'application de l'arrêté du 9 mai 2017 en vigueur, une serre agricole est considérée comme un bâtiment. Jusqu'en 2018, les serres photovoltaïques pouvaient même, sous certaines conditions, bénéficier de la prime d'« intégration au bâti ».

- **L'appel d'offre**

Il s'agit d'une procédure de mise en concurrence où chaque candidat présentant un projet doit proposer un prix d'achat de son électricité, appelé « prix de référence », afin de garantir la rentabilité de son installation, tout en cherchant à rester compétitif par rapport à ses concurrents.

Le lauréat bénéficiera, pendant les 20 ans du contrat, selon l'éligibilité de son installation :

- soit d'un contrat d'achat de l'électricité photovoltaïque produite, au prix de référence proposé par le lauréat
- soit d'un "complément de rémunération" (généralement pour les puissances supérieures à 500 kWc) qui viendra compléter ses revenus de vente sur le marché de l'électricité, sur la base du prix de référence qu'il aura défini.

Chaque appel d'offre met ainsi en concurrence un certain nombre de projets pour un volume de puissance appelée, défini par l'Etat. Les projets sont retenus selon une notation qui prend en compte essentiellement le prix proposé ainsi que d'autres critères, tel que le bilan carbone des modules photovoltaïques utilisés. Les appels d'offres sont opérés par la Commission de Régulation de l'Energie (ils seront notés AO CRE dans ce document) et sont accessibles à toute installation photovoltaïque de puissance supérieure à 100 kWc.

En France, en 2020, les appels d'offres suivants sont actuellement en cours :

- « Appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'Installations de production d'électricité à partir de l'énergie solaire, Centrales sur bâtiments, serres et hangars agricoles et ombrières de parking de puissance comprise entre 100 kWc et 8 MWc – février 2020 ». Il inclut les hangars et serres agricoles.

Ces projets bénéficient d'un tarif d'achat pour les puissances comprises entre 100 et 500 kWc, et de complément de rémunération pour les puissances entre 500 kWc et 8 MWc.

- « Appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'Installations de production d'électricité à partir de l'énergie solaire. Centrales au sol – février 2020 ». Il concerne les ombrières et les centrales au sol d'une puissance comprise entre 500 kWc et 30 MWc.
Ces projets bénéficient d'un complément de rémunération.

Le cahier des charges de cet appel d'offre exclut les terrains agricoles, au sens de l'urbanisme. Seuls sont acceptés :

- Les terrains urbanisés ou à urbaniser.
 - Les terrains naturels portant mention « énergie renouvelable ».
 - Les terrains dits « dégradés ».
- « Appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'installations de production d'électricité à partir de l'énergie solaire et situées dans les zones non interconnectées – juillet 2019 ». Cet appel d'offre couvre les territoires suivants : Corse, Guadeloupe, Guyane, La Réunion, Martinique et Mayotte.

Il concerne tout type d'installation photovoltaïque réparties en deux familles :

- Famille 1 : installations couplant production et stockage
 - Sous-famille 1a : installations sur bâtiments et ombrières de parking de puissance comprise entre 100 et 500 kWc.
 - Sous-famille 1b : installations sur bâtiments et ombrières de parking de puissance strictement supérieure à 500 kWc et inférieure ou égale à 1,5 MWc.
 - Sous-famille 1c : installations au sol de puissance strictement supérieure à 500 kWc et inférieure ou égale à 5 MWc.
- Famille 2 : installations non équipées de dispositif de stockage

- Sous-famille 2a : installations sur bâtiments et ombrières de parking de puissance comprise entre 100 et 500 kWc.
- Sous-famille 2b : installations sur bâtiments et ombrières de parking de puissance strictement supérieure à 500 kWc et inférieure ou égale à 1,5 MWc.
- Sous-famille 2c : installations au sol de puissance strictement supérieure à 500 kWc et inférieure ou égale à 5 MWc.

Comme pour l'appel d'offre centrale au sol en métropole, le cahier des charges de cet appel d'offre exclue les terrains agricoles, au sens de l'urbanisme. Seuls sont acceptés :

- o Les terrains urbanisés ou à urbaniser.
 - o Les terrains naturels portant mention « énergie renouvelable ».
 - o Les terrains dits « dégradés ».
- « Appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'Installations de production d'électricité innovantes à partir de l'énergie solaire – mars 2020 ». Il concerne des installations photovoltaïques de tout type, de puissance installée allant de 100 kWc à 5 MWc. Les installations sont classées en deux familles :
 - o Famille 1 : Installations photovoltaïques innovantes au sol de Puissance strictement supérieure à 500 kWc et inférieure ou égale à 5 MWc, pour un volume de 60 MW à chaque période.
 - o Famille 2 : Installations photovoltaïques innovantes sur Bâtiments, Hangars agricoles et Ombrières de parking, ou Installations agrivoltaïques innovantes de Puissance strictement supérieure à 100 kWc et inférieure ou égale à 3 MWc, pour un volume de 80 MW à chaque période.
 - « Appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'Installations de production d'électricité à partir d'énergies renouvelables en **autoconsommation** et situées en métropole continentale – décembre 2019 ». Il s'applique à toute installation d'énergie renouvelable d'une puissance comprises entre 100 kW et 1 MW. Cet appel d'offre n'est pas spécifique à l'énergie photovoltaïque. Il n'inclue cependant que les installations photovoltaïques sur bâtiments, dont les hangars et serres photovoltaïques.

Mécanisme d'octroi		Types et seuils de puissance	Dispositif de soutien	Modalités	Eligibilité du foncier agricole
Guichet ouvert		Toitures, < 100 kWc	Tarif d'achat fixé par arrêté	Selon arrêté tarifaire	Oui Hangars et serres
Appel d'offre (AO)	AO bâtiment	Toitures, 100 - 500 kWc	Prix proposé par le candidat	Selon cahier des charges	
		Toitures, 500 kWc - 8 MWc	Complément de rémunération sur la base d'un tarif de référence proposé par le candidat		
	AO auto - consommation	Toitures, 100 kWc - 1 MWc			
	AO centrales au sol	Centrales au sol, 500 kWc - 30 MWc			Non Terrains agricoles exclus
	AO innovation	Tous systèmes, 100 kWc - 5 MWc	Oui Hangars agricoles et installations agrivoltaïques de la famille 2, quelle que soit leur implantation (sur serres, en plein champs...)		
	AO zones non-interconnectées	Tous systèmes, 100 kWc - 5 MWc	Prix proposé par le candidat		Non Terrains agricoles exclus

Tableau 15 : Synthèse des soutiens financiers de l'Etat français pour le développement d'installations photovoltaïques et de l'éligibilité, selon le type de soutien, des terrains agricoles.

4.2. Cadre de la protection de l'espace agricole

4.2.1. La préservation de l'espace agricole à différentes échelles de planification

Le foncier agricole est aujourd'hui catégorisé de deux façons : la première par les documents d'urbanisme (PLU/PLUi, CC, POS, RNT et SCoT) définissant les zones A pour agricoles et la deuxième par la présence d'une activité agricole. En effet, le seul zonage A ne suffit à estimer l'ensemble des surfaces exploitées. Si le zonage A des documents d'urbanisme permet de désigner les espaces où l'activité agricole est avérée, il convient de ne pas oublier un nombre important d'espaces naturels qui sont aussi exploités par l'agriculture, souvent sous forme plus extensive à l'instar des alpages, zones côtières ou lits majeurs de certains fleuves. Ils sont dans ce cas caractérisés en zone N des documents d'urbanisme. Aussi, une zone A peut ne pas être exploitée par une activité agricole.

Afin de comprendre comment les documents d'urbanismes sont définis localement, différentes échelles d'objectifs doivent être présentées.

L'aménagement du territoire est régi par des documents cadres adoptés à différentes échelles. D'abord régionales (ou supra-régionales), les orientations d'aménagement sont ensuite déclinées à des échelles plus locales. Le schéma ci-dessous présente les principaux documents cadrant l'aménagement du territoire et la stratégie de développement de ces derniers.

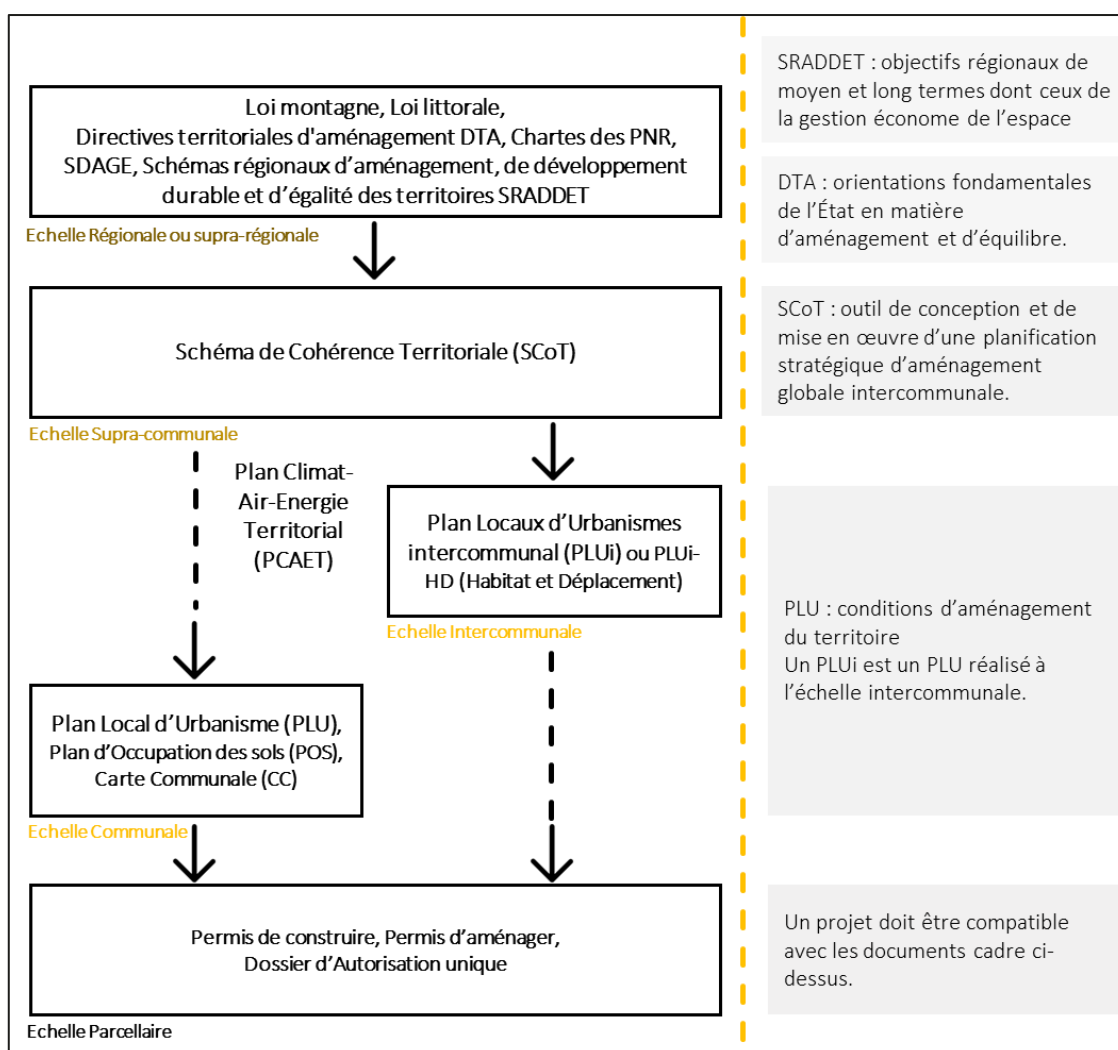


Figure 34 : Principaux documents cadrant l'aménagement du territoire – Source CETIAC

SRADDET : les objectifs régionaux de moyen et long termes

L'article 10 de la loi portant nouvelle organisation territoriale de la République (NOTRe) modifie les dispositions du Code Général des Collectivités Territoriales (CGCT) et introduit l'élaboration d'un Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires (SRADDET) parmi les attributions de la région en matière d'aménagement du territoire. Le Décret n° 2016-1071 du 3 août 2016 relatif au schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires définit les caractéristiques des SRADDET.

Le SRADDET fixe les objectifs de moyen et long termes en lien avec plusieurs thématiques : équilibre et égalité des territoires, implantation des différentes infrastructures d'intérêt régional, désenclavement des territoires ruraux, habitat, gestion économe de l'espace, intermodalité et développement des transports, maîtrise et valorisation de l'énergie, lutte contre le changement climatique, pollution de l'air, protection et restauration de la biodiversité, prévention et gestion des déchets.

DTA : les directives nationales

Issue de la loi d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire du 4 février 1995, modifiée par la loi d'orientation pour l'aménagement et le développement durable du territoire du 25 juin 1999, la Directive Territoriale d'Aménagement (DTA) est un document de planification et d'aménagement. Les DTA définissent les orientations fondamentales de l'État en matière d'aménagement, et d'équilibre entre les perspectives de développement, de protection et de mise en valeur des territoires.

Elles fixent les principaux objectifs de l'État en matière de localisation de grandes infrastructures de transport et des grands équipements, ainsi qu'en matière de préservation des espaces naturels, des sites et des paysages

SCoT : mise en œuvre locale d'un aménagement durable

Le Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT) est un document d'urbanisme institué par la loi Solidarité Renouvellement Urbain du 13 décembre 2000. Il est régi par les articles L. 141-1 et suivants du Code de l'Urbanisme. Le Schéma de cohérence territoriale (SCoT) est l'outil de conception et de mise en œuvre d'une planification stratégique intercommunale, à l'échelle d'un large bassin de vie ou d'une aire urbaine, dans le cadre d'un projet d'aménagement et de développement durables (PADD). Cet outil a pour objet de définir une stratégie globale d'aménagement du territoire.

Il fixe les orientations générales de l'aménagement de l'espace (zones à urbaniser et zones naturelles ou agricoles et forestières), les objectifs en matière d'équilibre de l'habitat, de mixité sociale, de transports en commun et d'équipements commerciaux ou économiques et il définit les espaces naturels ou urbains dont la protection présente une importance intercommunale.

Consommation d'espaces agricoles (Article L.141-3 du code de l'urbanisme) et SCoT :

Le rapport de présentation du SCoT présente une analyse de la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers au cours des dix années précédant l'approbation du schéma et justifie les objectifs chiffrés de limitation de cette consommation compris dans le document d'orientation et d'objectifs.

Le SCoT peut localiser, sur la base de diagnostics environnementaux, agricoles et forestiers, les zones d'implantations potentielles des énergies renouvelables (dont le photovoltaïque), puis évaluer leurs impacts à une échelle pertinente. Aussi, des classifications relatives à la priorisation des espaces agricoles peuvent être proposées.

PLU et PLUi : définition à la parcelle des espaces agricoles et des règlements

Le Plan local d'urbanisme (PLU) est un document d'urbanisme qui construit un projet d'aménagement à l'échelle d'une commune ou d'un groupement de communes (PLUi). Le Plan local d'urbanisme favorise l'émergence d'un projet de territoire partagé. Il prend en compte les politiques nationales et territoriales d'aménagement et les spécificités d'un territoire (Art. L.121-1 du code de l'urbanisme).

Introduit par la loi « Solidarité et Renouvellement Urbain » du 13 décembre 2000 en remplacement des précédents « Plans d'Occupation des Sols » (POS), et modifié par les lois « Urbanisme et Habitat » du 2

juillet 2003 puis portant « Engagement National pour le Logement » du 13 juillet 2006, le Plan Local d'Urbanisme (PLU) est un document d'urbanisme qui, à l'échelle du groupement de communes ou de la commune, traduit un projet global d'aménagement et d'urbanisme et fixe en conséquence les règles d'aménagement et d'utilisation des sols.

La loi Grenelle 2, ou « Engagement National pour l'Environnement », en date du 12 juillet 2010, complète ce dispositif législatif en assignant aux PLU de nouvelles missions, en leur permettant de mobiliser de nouveaux instruments d'intervention et en renforçant leur articulation avec les Schémas de Cohérence Territoriale (SCoT). Elle modifie sa composition et incite à l'élaboration de PLU d'échelle intercommunale (PLUi) aux prérogatives élargies. Cette incitation a été renforcée par la loi ALUR du 24 mars 2014. Un décret, entré en vigueur le 1er janvier 2016, modernise le PLU. Son objectif est de passer d'un urbanisme réglementaire à un urbanisme de projet.

Le PLU (ou PLUi) détermine les conditions d'un aménagement du territoire respectueux des principes du développement durable, en particulier par une gestion économe de l'espace, et la réponse aux besoins de développement local. Le nouveau règlement du PLU est structuré autour de trois grands axes : l'affectation des zones et la destination des constructions, les caractéristiques urbaines, architecturales, naturelles et paysagères, ainsi que les équipements et les réseaux.

Consommation d'espaces agricoles et PLU (Article L. 151-4 et L.151-5 du code de l'urbanisme) :

Le rapport de présentation du PLU(i) analyse la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers au cours des dix années précédant l'approbation du plan ou depuis la dernière révision du document d'urbanisme et la capacité de densification et de mutation de l'ensemble des espaces bâtis, en tenant compte des formes urbaines et architecturales.

Le projet d'aménagement et de développement durables du PLU fixe des objectifs chiffrés de modération de la consommation de l'espace et de lutte contre l'étalement urbain. Il peut ainsi favoriser ou freiner le développement des EnR sur son territoire. Les énergies renouvelables et le photovoltaïque peuvent bénéficier de zones d'implantation préférentielles sous la forme de zones naturelles destinées à l'exploitation de centrales solaires photovoltaïques, NPV par exemple. Sur certains territoires des zonages Anr (zones agricoles destinées au développement de projets d'énergies renouvelables), voire Apv (secteur agricole destiné au développement de projet photovoltaïque) sont ponctuellement recensés.

4.2.2. Les installations photovoltaïques : un équipement collectif autorisé sous conditions de compatibilité

Initialement, la circulaire du 18 décembre 2009 affirme que les projets d'installations photovoltaïques n'ont pas vocation à être installés en zones agricoles, notamment cultivées ou utilisées pour des troupeaux d'élevage. Dès lors, l'installation d'une installation photovoltaïque sur un terrain situé dans une zone agricole dite zone A des PLU, ou sur un terrain à usage agricole, est généralement inadaptée compte tenu de la nécessité de conserver la vocation agricole des terrains concernés.

Des dispositions concernant la préservation des espaces agricoles ont été introduites par la loi n° 2010-874 du 27 juillet 2010. La loi précise les règles applicables aux constructions et installations nécessaires à des équipements collectifs auxquels appartiennent les installations photovoltaïques. Les constructions et installations nécessaires à des équipements collectifs peuvent être autorisées dans les zones naturelles, agricoles ou forestières des plans locaux d'urbanisme dès lors qu'elles ne sont pas incompatibles avec l'exercice d'une activité agricole, pastorale ou forestière du terrain sur lequel elles sont implantées et qu'elles ne portent pas atteinte à la sauvegarde des espaces naturels et des paysages.

Aussi, deux types d'installations photovoltaïques ayant un lien avec l'agriculture, sont à distinguer :

- **Les constructions et installations agricoles sur lesquelles des panneaux photovoltaïques peuvent être posés**, comme les bâtiments et les serres. Pour être autorisées en zone agricole, **ces installations doivent être « nécessaires à l'activité agricole »** exercée sur le terrain d'assiette (article R. 151-23 du code de l'urbanisme pour les communes sous PLU(i) ; art. L. 161-4 CU pour les communes sous carte communale ; art. L. 111-4 CU pour les communes soumises au RNU).

- **Les centrales photovoltaïques au sol**, considérées comme des « constructions et installations nécessaires à des équipements collectifs ou à des services publics », notamment au vu de la contribution à la satisfaction d'un besoin collectif par la production d'électricité vendue au public (voir par exemple l'arrêt de la CAA de Nantes, 23 octobre 2015, n°14NT00587). **Pour être autorisées, ces centrales ne doivent pas être incompatibles avec l'exercice d'une activité agricole, pastorale ou forestière** sur le terrain d'implantation (art. L. 111-4 CU pour les communes soumises au RNU) et ne pas porter atteinte à la sauvegarde des espaces naturels et des paysages (art. L. 151-11 CU pour les communes sous PLU(i) et art. L. 161-4 CU pour les communes sous carte communale).

4.2.3. L'analyse des effets sur l'économie agricole : l'étude préalable agricole

Les effets sur l'activité agricole se limitaient, avant 2017, à l'étude du milieu humain des études d'impact environnemental. Depuis le décret n°2016-1190 du 31 août 2016, les installations photovoltaïques en zones agricoles et sur une surface supérieure à 5 ha (voire 1 ha suivant les départements) sont soumises à la réalisation d'une étude préalable agricole. Cette étude analyse l'état initial de l'activité agricole et de son économie ainsi que les effets du projet d'installation photovoltaïque sur cette dernière. Lorsqu'une activité agricole est prévue au sein de l'installation photovoltaïque, une comparaison entre l'activité initialement présente et celle projetée doit permettre de conclure quant à la compatibilité avec le maintien de l'activité agricole.

L'étude préalable agricole et la compensation agricole collective

La loi n° 2014-1170 du 13 octobre 2014 d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt a introduit, dans le code rural, les études préalables agricoles (EPA) à tout projet susceptible de générer des conséquences négatives pour l'agriculture, ainsi que l'obligation d'éviter/réduire voire de compenser ces impacts.

Le décret n°2016-1190 du 31 août 2016 précise que les projets soumis à étude préalable agricole sont ceux qui répondent à 3 critères :

- Projets soumis à une étude d'impact systématique (condition de nature): c'est le cas des installations photovoltaïques supérieures à 250kWc.
- Projets situés en zone naturelle, agricole ou forestière affectée à une activité agricole dans les 5 années précédant le dépôt du dossier de demande d'autorisation du projet, ou dans les 3 ans pour les zones à urbaniser (condition de localisation).
- Surface agricole prélevée définitivement par le projet supérieur à 5 hectares (condition de consistance). Il est à noter que ce seuil de 5ha est un seuil par défaut : le Préfet de département peut tout à fait définir un seuil compris entre 1 et 10 hectares.

L'étude préalable doit contenir 5 items, décrits par le décret n° 2016-1190 du 31 août 2016 relatif à l'étude préalable et aux mesures de compensation prévues à l'article L. 112-1-3 du code rural et de la pêche maritime.

Ces cinq items sont présentés dans l'organigramme ci-dessous :

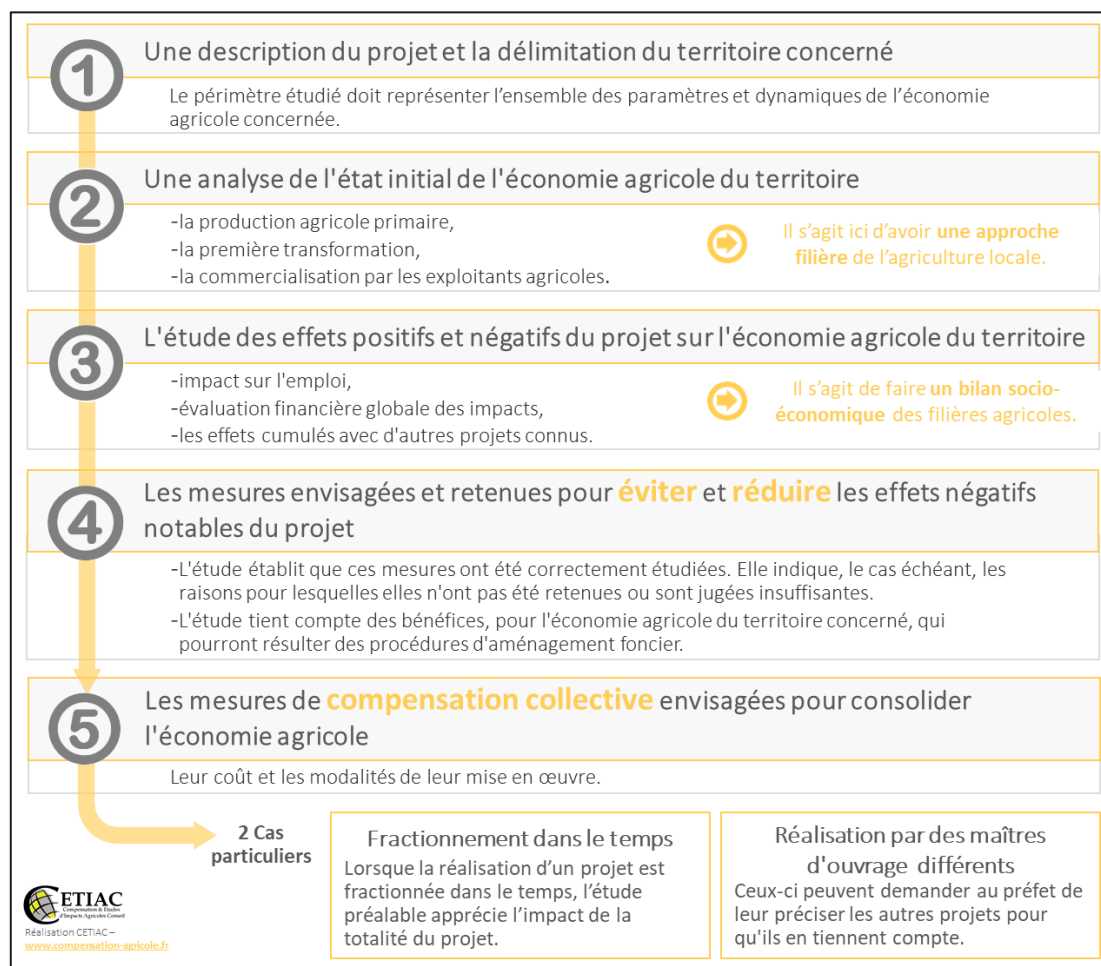


Figure 35 : Informations contenues dans l'étude préalable agricole

Les projets d'installations photovoltaïques qui présentent une activité agricole dans leur emprise se distinguent des projets dans lesquels les sols ne sont pas valorisés. Néanmoins, l'étude préalable, réalisée par le maître d'ouvrage, va déterminer, en fonction du projet, du territoire concerné, de l'analyse de l'économie locale, et des effets induits, si l'économie agricole est impactée et si elle nécessite ou non des mesures de compensation. Les conclusions peuvent donc être très différentes d'un projet à l'autre, et il n'est pas possible d'affirmer, en toutes circonstances, que tous les projets photovoltaïques qui maintiendraient une activité agricole dans leur emprise n'auraient pas d'impact négatif et ne devraient pas conduire à des mesures de compensation.

L'étude préalable agricole est soumise à l'avis motivé du préfet, qui doit statuer dans les quatre mois à compter de la saisine du pétitionnaire et après consultation de la Commission Départementale de la Préservation des Espaces Naturels, Agricoles et Forestiers (CDPENAF).

La CDPENAF associe des représentants de l'Etat, des collectivités territoriales, des professions agricoles et forestières, de la chambre d'agriculture, d'une association locale affiliée à un organisme national à vocation agricole et rurale, des propriétaires fonciers, des notaires, des associations agréées de protection de l'environnement, de la fédération départementale des chasseurs et de l'INAO. Elle se prononce sur l'étude préalable agricole proposée par le développeur et, en particulier, sur l'existence d'effets négatifs notables du projet sur l'économie agricole, sur la nécessité de mesures de compensation collective et sur la pertinence et la proportionnalité des mesures proposées.

La CDPENAF est, par ailleurs, l'un des organismes qui évalue l'adéquation de la répartition des zones et des documents d'urbanismes au regard des enjeux de préservation des espaces naturels, agricoles et forestiers.

4.2.4. Modes de développement des installations photovoltaïques sur foncier agricole

Lorsque le foncier est en zone agricole, la plupart des développeurs demandent aujourd'hui la mise en compatibilité du PLU (ou autre document d'urbanisme). Lorsque le zonage est en zone A pour « agricole », les développeurs se rapprochent de la mairie (ou collectivité compétente) pour modifier le classement et adopter un passage en zone U ou AU pour « urbaine » ou « à urbaniser » voire en zone N pour « naturelle ». En effet, si le zonage A est modifié, après passage en CDPENAF, le projet peut prétendre aux appels d'offres « classiques » opérés par la CRE. Toutefois, le développeur devra prouver une activité agricole significative dans le cadre de la compensation agricole collective (si une activité agricole était présente sur le site initialement).

Certains développeurs gardent le zonage agricole sur l'emprise. Ces projets ne sont donc plus éligibles aux appels d'offres « classiques » opérés par la CRE (puisque leurs cahiers des charges interdit l'utilisation des terrains agricoles) et ils doivent, pour pouvoir être réalisés, impérativement garantir une compatibilité avec une activité agricole. Ces projets, souvent de grande taille, sont aussi soumis, en second temps, à la compensation agricole collective. Enfin, quelques cas expérimentaux tendent à concevoir des installations pour qu'elles deviennent des outils agricoles. Ces installations sont alors éligibles à l'« AO CRE Innovation » visant des installations de production d'électricité solaire innovantes en tant qu'installations agrivoltaïques.

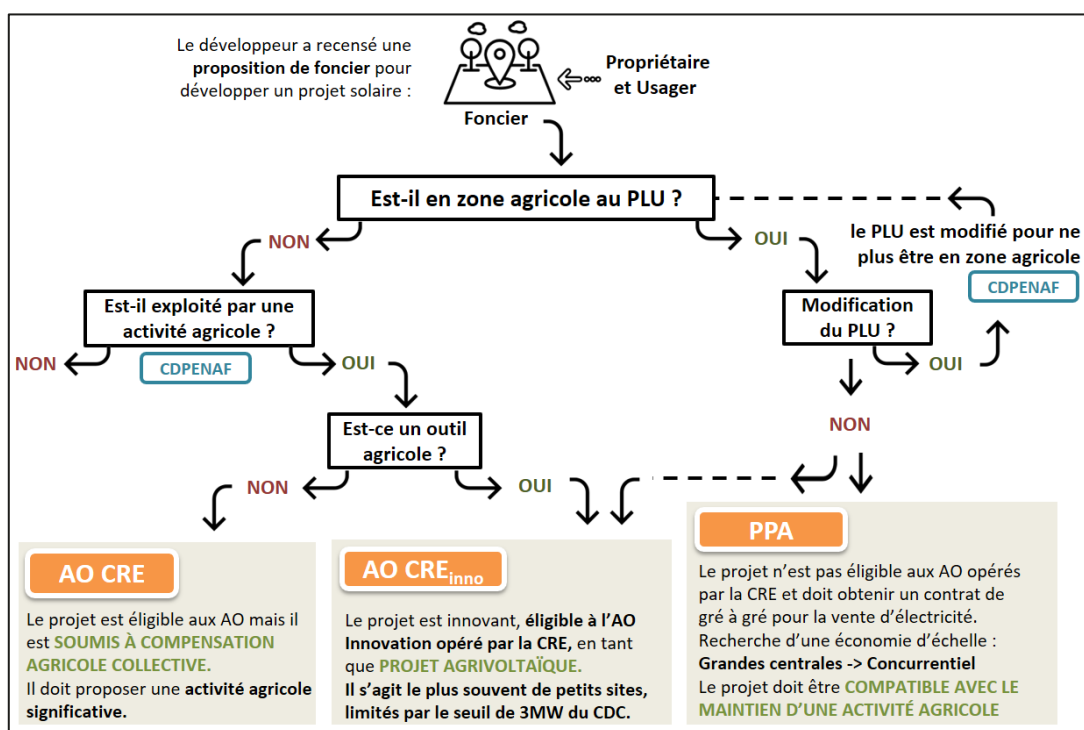


Figure 36 : Schéma récapitulatif des modes de développement des installations photovoltaïques sur foncier agricole

Toutefois, aucune réglementation ne précise ce qu'est une « activité agricole significative » ni les « conditions de compatibilité avec une activité agricole ». Ces démonstrations ne sont ni normées, ni cadrées à ce jour.

En ce qui concerne les centrales solaires au sol, un guide à destination des services de l'Etat instructeurs des dossiers a été publié¹⁵. Par ailleurs, quelques jurisprudences, précisées ci-dessous, tendent à préciser cette notion.

4.3. Jurisprudence liée au photovoltaïque sur terrains agricoles

4.3.1. Décisions du conseil d'Etat

Une distinction est faite dans la jurisprudence du Conseil d'Etat en fonction, d'une part, des équipements collectifs (donc des centrales solaires au sol) avec le critère de « compatibilité » avec l'activité agricole », et d'autre part, des constructions et installations à usage agricole de type serres solaires, avec le critère de « nécessité avec l'activité agricole ».

Serres photovoltaïques

Dans le cas des installations de type serres solaires, le Conseil d'Etat est venu donner une interprétation favorable à la cohabitation entre PV et agriculture en admettant dans un arrêt du 12 Juillet 2019¹⁶ (n° 422542) que « *la circonstance que des constructions et installations à usage agricole puissent aussi servir à d'autres activités, notamment de production d'énergie, n'est pas de nature à leur retirer le caractère de constructions ou installations nécessaires à l'exploitation agricole au sens de l'article R. 123-7 du code de l'urbanisme et du règlement des zones agricoles du plan local d'urbanisme (PLU) de la commune, dès lors que ces autres activités ne remettent pas en cause la destination agricole avérée des constructions et installations en cause.* »

Autrement dit, les installations de production d'énergie solaire peuvent être autorisées même si elles ne sont pas entièrement consacrées à l'activité agricole, sous réserve que la destination principale de ces constructions et installations demeure agricole, et que les « autres activités » restent annexes.

Centrales au sol

Le 8 février 2017, le Conseil d'Etat¹⁷ a publié un arrêt concernant la mise en place d'un parc photovoltaïque d'une puissance de 12 MW sur la commune de Viabon. Le tribunal administratif d'Orléans avait rejeté la demande de permis de construire de cette centrale (jugement du 31 décembre 2013), annulé par l'arrêt du 23 octobre 2015 par la Cour Administrative d'Appel (CAA) de Nantes. Les 21 Décembre 2015 et 21 Mars 2016, le ministre du logement et de l'habitat durable a demandé au conseil d'Etat d'annuler la décision de la CAA.

Le Conseil d'Etat a alors rappelé les dispositions des articles L.421-6 et L. 123-1 du code de l'urbanisme, qui expliquent que « *les constructions et installations nécessaires à des équipements collectifs peuvent être autorisées dans les zones naturelles, agricoles ou forestières :*

- *dès lors qu'elles ne sont pas incompatibles avec l'exercice d'une activité agricole, pastorale ou forestière du terrain sur lequel elles sont implantées*
- *et qu'elles ne portent pas atteinte à la sauvegarde des espaces naturels et des paysages ».*

Dans le cas des centrales solaires au sol, le Conseil d'Etat est venu apporter d'importantes précisions sur cette notion de compatibilité avec l'activité agricole dans sa décision du 8 février 2017, n° 395464 : il rappelle les dispositions du code de l'urbanisme et précise qu'« *il appartient à l'administration, sous le contrôle du juge de l'excès de pouvoir, d'apprécier si le projet permet l'exercice d'une activité agricole, pastorale ou forestière significative sur le terrain d'implantation du projet, au regard des activités qui sont effectivement exercées dans la zone concernée du plan local d'urbanisme ou, le cas échéant, auraient*

¹⁵ Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2020. Guide 2020 : L'instruction des demandes d'autorisation d'urbanisme pour les centrales solaires au sol

¹⁶<https://www.legifrance.gouv.fr/affichJuriAdmin.do?idTexte=CETATEXT000038759075>

¹⁷<https://www.legifrance.gouv.fr/affichJuriAdmin.do?oldAction=rechJuriAdmin&idTexte=CETATEXT000034017910&fastReqId=79869073&fastPos=1>

vocation à s'y développer, en tenant compte notamment de la superficie de la parcelle, de l'emprise du projet, de la nature des sols et des usages locaux».

C'est désormais au regard de ce cadre d'analyse et au minimum de ces quatre critères (superficie de la parcelle, emprise du projet, nature des sols, usages locaux) que l'administration, sous le contrôle des juges, devra regarder les projets qui leur sont soumis.

Compétences locales pour l'appréciation du maintien de l'activité agricole significative

Dans son arrêté du 8 février 2017, le Conseil d'Etat précise qu'« il appartient à l'administration, sous le contrôle du juge de l'excès de pouvoir, d'apprécier si le projet permet l'exercice d'une activité agricole, pastorale ou forestière significative sur le terrain d'implantation du projet, au regard des activités qui sont effectivement exercées dans la zone concernée du plan local d'urbanisme ou, le cas échéant, auraient vocation à s'y développer ». Cela indique que ces réglementations concernent l'ensemble des zones agricoles, qu'il existe un plan d'urbanisme (Plan Local d'Urbanisme, Plan d'Occupation des Sols, carte communale) ou non (Règlement National d'Urbanisme). Le Conseil d'Etat indique également les critères devant être pris en compte par les administrations locales : « en tenant compte notamment de la superficie de la parcelle, de l'emprise du projet, de la nature des sols et des usages locaux. »

4.3.2. Les serres PV bénéficient d'une autorisation systématique

Différents exemples montrent que la jurisprudence tranche régulièrement en faveur de la mise en place des installations PV lorsqu'il s'agit de serres photovoltaïques.

Arrêté	Emprise PV	Autres considérations	Réglementation foncière agricole
CAA Marseille, 3 avril 2015 (n°13MA02539) ¹⁸	4 ha sur 22	Cultures de fruits et légumes en AB, ancienne exploitation viticole ayant arraché ses pieds suite à des difficultés financières de la filière	
CAA Lyon, 21 mai 2019, (n°18LY01639) ¹⁹	2 ha	Rénovation de serres agricoles à l'abandon pour le développement d'une culture de stévia biologique	PLU
CAA Marseille, 25 juin 2019, (n°18MA00634) ²⁰	3.5 ha sur 287		Plan d'Occupation des sols
Conseil d'Etat, 12 Juillet 2019 (n°422542) ²¹	2 ha sur 5		PLU
CAA Bordeaux, 18 février 2020, (n°18BX00809) ²²		Serre photovoltaïque sur Kiwi, permettant de relancer une exploitation agricole viticole atteinte d'une bactérie	Zone non constructible carte communale

Tableau 16 : Jurisprudences autorisant les serres PV

¹⁸<https://www.legifrance.gouv.fr/affichJuriAdmin.do?oldAction=rechJuriAdmin&idTexte=CETATEXT000030465303&fastReqId=1487881672&fastPos=2>

¹⁹ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichJuriAdmin.do?idTexte=CETATEXT000038511470>

²⁰ <https://www.doctrine.fr/d/CAA/Marseille/2019/U52DAA3656DE89C598D7F>

²¹<https://www.legifrance.gouv.fr/affichJuriAdmin.do?idTexte=CETATEXT000038759075>

²²<https://www.legifrance.gouv.fr/affichJuriAdmin.do?oldAction=rechJuriAdmin&idTexte=CETATEXT000041617055&fastReqId=1487881672&fastPos=2>

4.3.3. Les centrales au sol souvent interdites

A l'inverse, les centrales au sol sont, quant à elles, souvent interdites²³ mais des exceptions existent toutefois, comme le montre le tableau ci-dessous :

Production agricole avant PV	Production agricole après PV	Emprise PV	Autres considérations	Autorisation	Arrêté
Géraniums	Géraniums et stockage matériel (moitié terrain)	2 ha sur 5,5 ha	Situé à La Réunion. Panneaux solaires concourant à activité agricole: entreposage et protection plante, amélioration de la rentabilité de l'exploitation agricole	Oui	CAA Bordeaux, 4 octobre 2012 n° 11BX01853 ²⁴
	Elevage ovin	6 ha sur 40 000 ha de la commune	Installation en Martinique. Une centrale au sol considérée comme « extension de l'urbanisation » au sens loi littoral Ici autorisation du fait de la faible surface du projet	Oui	CAA Bordeaux, 4 avril 2013, n°12BX00153 ²⁵
Prairie fauchée et pâturée par bovins	Elevage alpage et apiculture	23 ha au total dont 7 ha à un exploitant (sur 110 ha propriété)	Déplacement élevage bovin et fourrages	Oui	CAA Bordeaux, 15 mars 2018, n°16BX02223, 16BX02224, 16BX02256 ²⁶
2,3 ha cultivés en céréales et élevage	Elevage ovin	Totalité surfaces sous PV accessibles aux ovins 3,4 ha sur 21 ha	Qualité terrains jugée très limitée à moyenne (pas de repreneur). Mise en place panneaux PV améliorera qualité herbe et nombre de bêtes. Mise en place sur terrains actuellement inexploités ou inexploitable.	Oui	CAA Bordeaux, 9 mai 2019, n°17BX01715 ²⁷
Céréales	Apiculture	45 000 panneaux sur 26,6 ha sur 73 ha	Terres agricoles considérées médiocres	Non	CE, 31 juillet 2019, n°418739 ²⁸

Tableau 17: Jurisprudences autorisant les centrales PV au sol

²³ BCTG Avocats, Projets solaires au sol et agriculture : les enseignements de la jurisprudence

²⁴ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichJuriAdmin.do?oldAction=rechJuriAdmin&idTexte=CETATEXT000026474315&fastReqId=610202296&fastPos=1>

²⁵ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichJuriAdmin.do?idTexte=CETATEXT000027287912&fastReqId=1626464494&fastPos=1&oldAction=rechJuriAdmin>

²⁶ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichJuriAdmin.do?oldAction=rechJuriAdmin&idTexte=CETATEXT000036712242&fastReqId=271543836&fastPos=1>

²⁷ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichJuriAdmin.do?idTexte=CETATEXT000038530308>

²⁸ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichJuriAdmin.do?idTexte=CETATEXT000038860059>

Deux critères sont mentionnés spécifiquement dans les arrêtés cités ci-dessus, qui justifient l'autorisation de la mise en place de centrales PV au sol :

- l'apport d'une plus-value au système agricole (comme l'amélioration de la qualité de l'herbe) ;
- une emprise au sol considérée comme faible par l'administration locale.

Il est intéressant de comparer l'autorisation d'une centrale au sol sur la commune d'Yvrac-et-Malleyrand (CAA de Bordeaux le 15 mars 2018) et l'interdiction d'une centrale au sol sur la commune de Viabon (CE le 31 juillet 2019). En effet, ces deux projets incluent une continuité de l'activité agricole par l'installation d'une jachère mellifère. A Viabon pourtant, le CE juge que « *le projet ne permettrait pas le maintien d'une activité agricole significative* ».

Il est possible que cette différence soit liée à l'emprise au sol, beaucoup plus importante à Viabon. Il est également possible que cette différence soit liée au type de production agricole en place sur ces surfaces avant la mise en place du projet PV : à Yvrac-et-Malleyrand, la surface considérée était une prairie fauchée et pâturée par des bovins, tandis qu'à Viabon, il s'agissait de cultures de céréales. Si tel est le cas, cela signifierait que les autorisations données aux centrales au sol peuvent varier en fonction des systèmes de production en place avant le projet et après le projet, en fonction de leur importance envers les objectifs locaux de développement agricole²⁹.

4.4. Cadre de l'agrivoltaïsme

4.4.1. Le cadre de l'appel d'offre "Innovation" opéré par la Commission de Régulation de l'Energie (AO CRE)

Le cahier des charges de l'AO CRE « Innovation »³⁰ a été le premier document à donner une définition des installations agrivoltaïques. D'après ce document, il s'agit d'« *installations permettant de coupler une production photovoltaïque secondaire à une production agricole principale en permettant une synergie de fonctionnement démontrable*. ». La synergie des productions doit être décrite et avec elle la « *garantie de la réversibilité du système photovoltaïque et les opérations de démantèlement en fin de vie* ».

Cette définition est large et suscite plusieurs interrogations.

Tout d'abord, comment définir une « production principale » par rapport à une « production secondaire » ? D'un point de vue strictement économique, il est en effet possible que la valeur économique engendrée par les panneaux photovoltaïques dépasse celle engendrée par l'activité agricole.

Par ailleurs, le terme « synergie de fonctionnement » doit être explicité. En effet, une synergie implique que chacune des composantes profite de la présence de l'autre. Le terme « démontrable » implique la nécessité d'une évaluation objective du « fonctionnement » du système. Pour cela, l'évaluation des rendements de production ne semble pas suffire : les rendements des deux productions n'étant pas forcément supérieures à deux productions, photovoltaïque et agricole, séparées. D'autres éléments et indicateurs économiques semblent donc nécessaire pour permettre l'évaluation du fonctionnement systémique de ces installations.

Ainsi, l'agrivoltaïsme est aujourd'hui encadré par cet AO CRE « Innovation » permettant ainsi d'expérimenter ces procédés et d'obtenir des retours d'expérience via le suivi agricole nécessaire pour candidater. Pour identifier les projets éligibles, l'ADEME est missionnée par le MTES, via la CRE, pour analyser et évaluer les dossiers, permettant ainsi une étude au cas par cas de chaque projet et une vérification de la synergie agricole en fonction des informations et arguments apportés par les Candidats dans leurs dossiers.

²⁹ BCTG Avocats, Projets solaires au sol et agriculture : les enseignements de la jurisprudence

³⁰ Cahier des charges 2019 de l'appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'Installations de production d'électricité innovantes à partir de l'énergie solaire, sans dispositifs de stockage

La composition de ces dossiers, telle que définie en 2020, est décrite dans l'encadré ci-dessous.

Composition du mémoire technique sur la synergie avec l'usage agricole [de l'installation agrivoltaïque] demandé dans le cahier des charges de l'appel d'offres innovation »

Description du projet et de la synergie agricole

1. La description globale du projet :

- Système : innovation proposée, types d'équipements, et emprise au sol.
- Acteurs et rôles respectifs : exploitant du système, agriculteur, organisme de recherche.

2. La description du projet agricole :

- Le(s) type(s) de culture(s) envisagée(s) et la production annuelle estimée.
- Le mode de culture envisagé : production hors-sol ou en plein champ.
- La géométrie et superficie des cultures envisagées.
- L'occupation des sols avant le projet et la gestion des éventuels conflits d'usages générés par le projet.

3. La description de la synergie entre le système photovoltaïque et la production agricole :

- Le principe du partage lumineux envisagé entre production électrique et agricole (orientation des modules photovoltaïques, principe de pilotage des modules en cas de structures mobiles, espace entre les modules, surface de modules photovoltaïques par rapport à la surface transparente de la toiture, etc).
- Le lien entre le dispositif photovoltaïque envisagé et chaque point du « 2. La description du projet agricole », avec notamment une justification des choix variétaux ou des besoins des cultures envisagées en fonction des conditions imposées par le générateur photovoltaïque.
- Les modalités envisagées pour garantir la réversibilité du système photovoltaïque et les opérations de démantèlement en fin de vie.
- L'implication de l'agriculteur dans le projet et la prise en compte de ses intérêts.
- Les retombées économiques du projet ainsi que le modèle d'affaires du projet.

4. Ce mémoire doit en outre justifier de façon précise et argumentée, par un expert reconnu (laboratoire de recherche, expert agronome, chambre d'agriculture), que le projet présente une vocation de production agricole viable et pérenne. Des données jugées non compatibles avec cet objectif entraînent une élimination du projet.

Convention de suivi agricole

Ce mémoire technique doit, par ailleurs, fournir obligatoirement la copie d'une convention établie entre l'agriculteur et un organisme professionnel ou scientifique pour le suivi des cultures précisant la nature et la durée du suivi. A défaut, l'offre est éliminée.

Pour la réalisation de ce suivi, une « zone témoin » devra être mise en place, de taille représentative et cultivée dans les mêmes conditions mais sans modules photovoltaïques. Les caractéristiques de cette zone témoin devront être fournies et justifiées dans le mémoire.

La convention doit expliciter les modalités de ce suivi : nature, durée, visites et audits de l'installation, types et méthodes de mesures, fréquences de ces mesures, comparaisons des résultats... Il devra comparer à minima la production agricole sous la zone agrivoltaïque et la zone témoin.

Les résultats de ce suivi doivent être transmis annuellement à l'Administration et à l'ADEME pour permettre un retour d'expérience technique sur ces projets.

4.4.2. Documents locaux de cadrage de l'agrivoltaïsme ou du photovoltaïque sur terrains agricoles

Le sujet de l'agrivoltaïsme étant en plein développement, plusieurs régions, départements ou entités locales ont récemment publié des doctrines, propositions de définition ou des cahiers des charges relatifs aux bonnes pratiques à adopter quant à la mise en place des panneaux photovoltaïques sur terrains agricoles.

Régions Pays de la Loire, Midi Pyrénées, Tarn et Garonne

Les deux régions, ayant publié le plus tôt des documents régionaux de cadrage sur le développement des projets photovoltaïques, sont la région Pays de la Loire et Midi-Pyrénées: dès 2010 et 2011 respectivement.

Le document de cadrage³¹ de la région Pays de la Loire fait allusion aux projets photovoltaïques « alibis », et souligne l'importance de vérifier la proportionnalité de la taille des centrales au sol avec le mode d'exploitation agricole située sous les panneaux.

Il est ainsi demandé aux porteurs de projets photovoltaïques sur terrains agricoles de justifier du caractère nécessaire à l'exploitation agricole. Par ailleurs, des ratios de surface par animal sont proposés pour aider les services de l'Etat à instruire les dossiers.

Les régions Midi-Pyrénées et le département du Tarn et Garonne ont également publié une note de cadrage des services de l'Etat pour l'instruction des projets solaires photovoltaïques pour la région et pour le Tarn et Garonne³².

Cette doctrine indique que le potentiel de développement du solaire hors surface agricole est suffisamment important pour permettre d'être très sélectif sur les projets. Si le terrain a fait l'objet d'un usage agricole (apprécié à travers le fait que le terrain a fait l'objet du versement d'aides publiques dans les 5 dernières années), il ne peut pas faire l'objet de l'implantation d'une centrale au sol. Dans le cas contraire, ou pour des terrains à vocation agricole, l'instruction peut dépendre selon les départements et des éléments complémentaires peuvent être demandés.

Les serres agricoles, en revanche, peuvent être implantées sous certaines conditions :

1. Justification technique et économique de l'activité sous serres :
 - Etude de marché ;
 - Justification de l'activité sous serre et non en plein air ;
 - Durée d'occupation annuelle ;
 - Compatibilité de l'activité sous serres avec l'ombrage partiel généré par les cellules photovoltaïques ;
 - Choix du type de serres ;
 - Irrigation.
2. Point d'attention en ce qui concerne le caractère inondable des terrains.

Région Nouvelle-Aquitaine

En 2020, la région Nouvelle-Aquitaine a publié un appel à projets pilotes et industriels pour des installations « Agri-solaires »³³. Cet appel à projets vise à proposer des aides à l'investissement d'installations « pilotes » non raccordées au réseau et d'installations « industrielles » raccordées au réseau et bénéficiant d'un tarif de rachat (AO CRE). Ces aides peuvent aller de 30 à 65% du coût total de l'investissement. Les différents critères qui sont mentionnés comme obligatoires dans les dossiers d'instruction sont les suivants :

3. Les caractéristiques techniques de l'installation :
 - Intégration de l'installation dans l'environnement agricole ;
 - Cohérence de la solution mise en place ;
 - Adaptation culturelle au projet photovoltaïque ;
 - Reproductibilité de la solution ;
4. Niveau global de performance énergétique de l'installation :
 - Niveau de production ;
 - Gestion optimisée de l'électricité (monitoring) ;
 - Moyen de stockage d'énergie ;
 - Démarche sociale et environnementale : Responsabilité sociétale ;
 - Respect de l'environnement et préservation de la biodiversité ;
 - Gestion de l'eau ;
5. Economie du projet :
 - Temps de retour brut (TRB) sur investissement ;
 - Taux de rentabilité interne (TRI) ;
 - Impacts financiers sur l'agriculture ;
 - Retombées économiques territoriales ;

³¹ Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement des Pays de la Loire, 2010. Le développement de l'énergie solaire photovoltaïque

³² Région Midi Pyrénées, Préfet Tarn et Garonne, 2011. Note de cadrage des services de l'Etat pour l'instruction des projets solaires photovoltaïques en Midi Pyrénées et en Tarn et Garonne

³³ Région Nouvelle-Aquitaine, 2020. Agri-solaire : projet pilote et industriel, appel à projets.

- Contrepartie pour l'exploitant agricole ;
6. Communication et sensibilisation autour de l'installation.

Région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur

La région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur, quant à elle, a publié un cadre régional pour le développement des projets photovoltaïques³⁴ sur son territoire. Ce cadre donne la priorité aux ombrières de parking, puis au photovoltaïque au sol sous deux conditions : la vérification de l'absence de faisabilité du projet en espace déjà anthropisé selon une analyse multicritère et la condition que le projet ait un faible impact environnemental et paysager.

Quatre types de zones sont ainsi identifiées :

- Les zones réhabilitables, pour lesquelles au moins une disposition législative ou réglementaire interdit l'implantation d'équipement photovoltaïque ;
- Les zones à forts enjeux : Elles ne font pas l'objet d'une interdiction réglementaire mais il s'agit de zones remarquables. Une autorisation ne peut être envisageable que s'il y a une concertation approfondie entre les porteurs de projet et les services instructeurs ; si les incidences du projet sont évaluées ainsi que leurs effets cumulés, et si des mesures d'évitement et de réduction sont proposés avec le cas échéant des compensations suffisantes.
- Les zones à enjeux modérés : Il s'agit de zones qui ne présentent pas d'enjeux forts identifiés, sur lesquelles l'implantation de panneaux photovoltaïques est, à priori, possible, sous réserve de confirmer des incidences modérées ;
- Les zones à privilégier : Il s'agit des zones sans enjeux identifiées telles que les sites artificialisés, dégradés ou pollués.

Enfin, les serres photovoltaïques ne sont pas recommandées par ce document cadre, sauf cas exceptionnels : dans le cas de technologies innovantes ou d'une prise en compte importante des besoins agronomiques dans la conception de l'outil. Les recommandations concernent la luminosité, la géométrie de la serre et sa ventilation. Ce type de projets doit toutefois être appuyé par des organismes professionnels du monde agricole (Chambres d'agriculture, associations, comités techniques).

Cadrages départementaux

D'autres documents de cadrage ont été publiés à un niveau plus local. En particulier, plusieurs Directions départementales des territoires (DDT) ont publié des documents cadres pour le développement du solaire, comme l'Indre-et-Loire³⁵ et la Haute-Garonne³⁶. D'autres DDT ont publié des guides de bonnes pratiques à destination des porteurs de projets au sol, tels que la DDT des Alpes de Haute-Provence³⁷ et la DDT du Gard³⁸.

Autres

Enfin, d'autres acteurs ont également publié des documents de cadrage sur le développement du solaire sur leur territoire, comme la Chambre d'Agriculture de l'Yonne³⁹ et la Commission départementale de la préservation des espaces naturels, agricoles et forestiers (CDPENAF) du Loiret⁴⁰.

³⁴ Région Provence-Alpes Côte d'Azur, 2019, Cadre régional pour le développement des projets photovoltaïques en Provence-Alpes-Côte d'Azur

³⁵ DDT de l'Indre-et-Loire, 2020. Document cadre pour le développement de l'énergie solaire photovoltaïque dans le département d'Indre-et-Loire

³⁶ DDT Haute-Garonne, 2019. Réaliser des projets photovoltaïques en dehors des zones urbanisées en Haute-Garonne

³⁷ DDT des Alpes de Haute Provence, 2018. Guide de recommandations à destination des porteurs de projet des parcs photovoltaïques au sol

³⁸ DDT du Gard, 2017. Guide à l'attention des porteurs de projets photovoltaïques au sol

³⁹ Chambre d'Agriculture de l'Yonne, 2019. Délibération professionnelle concernant le développement du photovoltaïque dans le département de l'Yonne

⁴⁰ CNPENAF du Loiret, 2019. Doctrine sur le développement des installations photovoltaïques au sol

4.5. Constats, enjeux et attentes de la filière photovoltaïque pour le développement d'installations photovoltaïques sur terrain agricole en France

4.5.1. Méthodologie des entretiens avec les développeurs

Afin de comprendre les enjeux et attentes du secteur économique, des entretiens ont été menés auprès d'une quinzaine de développeurs photovoltaïques. Ces entretiens ont été menés dans le but de dégager les grandes tendances en matière de développement du photovoltaïque sur terrains agricoles. Ils ont permis en outre d'étudier les modèles d'affaires des systèmes photovoltaïques agricoles développés (peu abordés dans la littérature).

Les échanges réalisés avec les développeurs ont pris la forme d'échanges ouverts non directifs, sous « le modèle d'interviews ». Une présentation du contexte de l'étude, de ses objectifs et des étapes méthodologiques a été apportée en introduction par le groupement. Il a d'abord été demandé aux développeurs de présenter l'identité de leur structure et de la stratégie avancée en matière de développement (de manière générale et sur terrains agricoles). Ils ont également pu exprimer leur vision des enjeux du photovoltaïque sur terrains agricoles. Des précisions ont ensuite été demandées sur les modèles d'affaires mis en œuvre et envisagés, les suivis existants et les données disponibles. Aussi, un retour d'expérience sur les pratiques recensées (bonnes et mauvaises) et sur les perspectives de développement, en matière de politiques publiques a été demandé.

Les projets et dynamiques recensés sont en grande partie soumis à la protection de données concurrentielles : AO CRE innovation, projets en développement, dépôts de marques/brevets, suivis internes, sécurisation du foncier et contractualisation en cours. Les données confidentielles, les localisations géographiques de projets, les noms, les actions et thèses en cours et principaux bilans économiques n'ont pas été communiqués et n'apparaissent donc pas dans le présent rapport.

4.5.2. Types de systèmes développés et systèmes agricoles ciblés

4.5.2.1. Les centrales au sol avec activités d'élevage, un modèle dominant

Sur les quinze développeurs interrogés, neuf développeurs sont spécialisés dans le développement de centrales photovoltaïques au sol, couplées avec les productions suivantes : **ovins viande, ruches (voire des élevages de reines), ou plus rarement des céréales.**

Ces systèmes se développent préférentiellement sur des **zones à faible valeur ajoutée à l'hectare** (ndlr cela ne veut pas dire à faible potentiel agronomique). Certains développeurs en font le cœur de leur intervention, en privilégiant des zones à forte déprise agricole (systèmes très extensifs, productions sur de grandes surfaces, nombre d'ETP/ha faible, zones intermédiaires agricoles, secteurs sans renouvellement d'agriculteurs et à tendance au fort agrandissement des exploitations, parcelles non irrigables), en considérant qu'ils sont porteurs d'opportunités pour redynamiser ces zones grâce à leurs projets, aux efforts d'aménagement et aux engagements sur le long terme. Les opportunités foncières qu'ils soulèvent sont souvent à l'initiative de grands propriétaires – exploitants ou agriculteurs en fin d'activité, ayant des difficultés à trouver un repreneur ou cherchant à valoriser une partie de la SAU dont les filières sont en perte de vitesse (productions animales, grandes cultures).

Ces développeurs ont tous des centrales en activité, très souvent en milieu rural avec des contrats d'entretiens souvent passés avec des exploitations agricoles ou des établissements de travaux agricoles pour limiter l'enherbement sous les modules afin que ce dernier ne soit pas responsable d'un ombrage qui dévaluerait la production d'énergie. Cet entretien de centrales, similaire à ceux des espaces verts publics ou industriels, prend d'ailleurs régulièrement la forme d'éco-pâturages (préconisations environnementales) avec quelques ovins, type moutons d'Ouessant. Du fait de bonnes relations sur le long-terme, des intérêts ont pu être trouvés pour chaque partie et la conversion des éco-pâturages vers des activités d'élevage professionnelle s'est peu à peu développée. Grâce à la prise en compte de l'économie agricole dans les dossiers d'autorisation, désormais, la structure photovoltaïque essaie de s'adapter aux contraintes de l'activité agricole.

Ces types de projets de centrales au sol semblent représenter la majorité des surfaces agricoles françaises concernées par le photovoltaïque, avec un retour d'expérience sur plusieurs années d'activité.

4.5.2.2. Le développement des serres en ombrières comme outils agricoles, des réflexions à optimiser et en construction

Si dix développeurs ont déjà mis en place (ou projettent de mettre en place) une serre ou une ombrière surélevée, il s'agit généralement d'un seul projet test pour quatre d'entre-deux.

Aussi, six développeurs interrogés sont spécialisés dans des systèmes photovoltaïques qui ciblent des cultures à forte valeur ajoutée à l'hectare sous la forme d'un outil agricole type serre photovoltaïque ou ombrière (mobile ou fixe). Les surfaces concernées demeurent encore très faibles (moins d'1ha par projet).

De plus, deux développeurs ont développé une stratégie sur le sujet en créant des filiales spécialisées dans l'accompagnement au développement de ces projets auprès des agriculteurs.

Ces systèmes se positionnent en améliorateur de la qualité organoleptique et/ou commerciale des productions. Les systèmes « outils agricoles » proposés sont diversifiés. Il peut s'agir d'ombrières mobiles ou fixes, comme de serres photovoltaïques.

Arboriculture, viticulture et maraîchage sont les productions les plus concernées par les ombrières. Concernant les serres, la diversité potentielle des cultures est très importante (une quarantaine de cultures) mais les développeurs n'ont pas fourni, à ce stade, de retours sur les cultures qui seraient adaptées ou non.

Il est à noter que les développeurs font une distinction entre les projets de centrales au sol sur terrains agricoles et les projets d'ombrières/serres : les développements ne sont pas identiques et une distinction de vocabulaire est faite en interne (AgriPV/AgriArbo pour les systèmes innovants et AgriSOL/AgriElevage pour les centrales au sol). Les modèles d'affaire, les conditions de développement, la mise en place ou non d'un protocole expérimental diffèrent suivant les types de projets.

Lorsqu'un foncier est ciblé, les développeurs évaluent désormais la faisabilité du développement du projet photovoltaïque sur terres agricoles avant de lancer l'élaboration du permis de construire incluant les études d'impact réglementaires. Ainsi, une nouvelle approche de développement apparaît, avec une organisation du projet et de la sécurisation du foncier prenant en compte les caractéristiques agricoles afin de muter vers un système photovoltaïque en co-activité avec la production agricole. Une grille d'analyse de la pertinence du projet au regard de l'activité agricole est ainsi adoptée au même titre que les caractéristiques environnementales, de raccordement et d'urbanisme.

Traditionnellement et chez la majorité des développeurs, trois points d'attention majeurs sont vérifiés par les développeurs et seuls les projets les moins risqués entrent en phase de développement. Ces trois points sont les suivants :

- La compatibilité du projet avec les documents d'urbanisme : l'impossibilité d'aboutir à une compatibilité est un critère rédhibitoire et le projet est abandonné.
- La faisabilité du raccordement au réseau électrique : si le raccordement est impossible (trop loin, trop coûteux, déjà saturé), le projet est abandonné car il ne sera pas rentable.
- La sensibilité environnementale du site : c'est un critère majeur. Si le projet se trouve au sein d'habitats d'espèces protégées, en zone inondable, à proximité d'un monument historique, le projet aura de très fortes contraintes et présentera tous les risques d'un refus de permis de construire.

Pour les projets sur terrain agricole, les développeurs ont ajouté un quatrième point d'attention lors de leur analyse de faisabilité : l'analyse du contexte agricole. Ainsi, les développeurs pré-évaluent en interne, avant l'élaboration de tout dossier réglementaire, si le système agricole actuel est compatible avec la mise en place d'un projet photovoltaïque en co-activité.

En rajoutant le quatrième point d'attention lors de l'analyse de la faisabilité, une grille de critère est élaborée, souvent grâce à l'internalisation d'ingénieurs agronome dans les équipes de développeurs, et définit si le foncier dispose bien des conditions suffisantes pour soutenir une co-activité. Il s'agit d'estimer

si l'exploitant agricole a déjà les compétences pour exploiter des productions sous modules photovoltaïques. Par exemple, est-il éleveur ovin (dans le cas de projet de centrale au sol) ? Est-il serriste (dans le cas de projet de serres photovoltaïques) ? A-t-il la main d'œuvre nécessaire ? Part-il en retraite dans les prochaines années ? Est-il en capacité de diversifier ses productions ? A-t-il imaginé les débouchés pour les futures productions ?

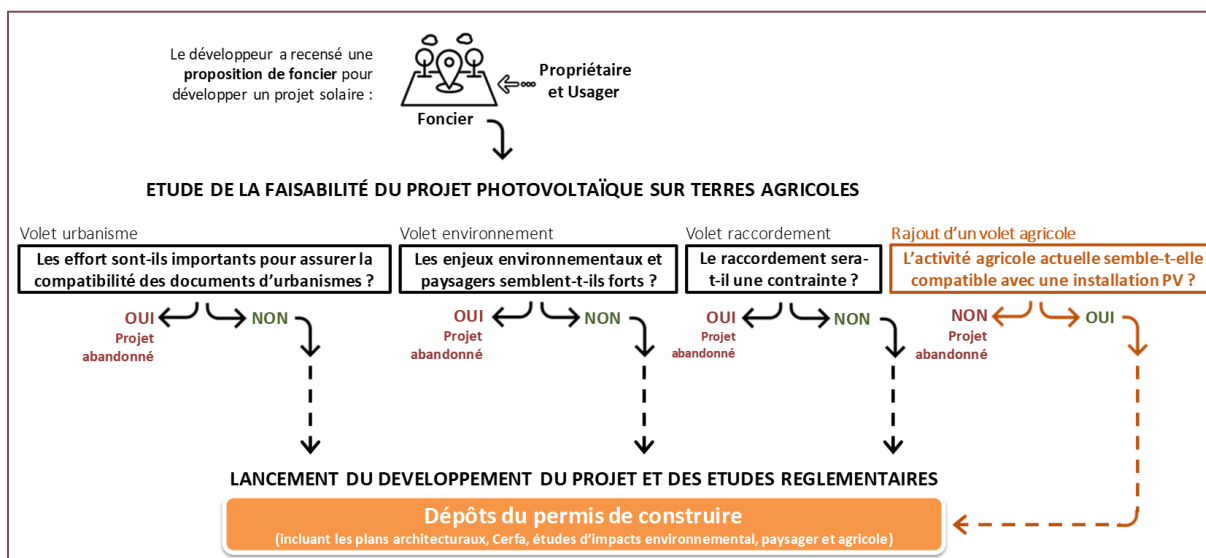


Figure 37 : Points d'attention étudiés par les développeurs avant le dépôt d'une demande de permis de construire pour une installation photovoltaïque sur terrain agricole (CETIAC)

4.5.3. Approche et modèles d'affaires du développeur et co-bénéfices avancés pour l'agriculture

L'expérience du photovoltaïque sur terres agricoles est globalement très récente pour les développeurs interrogés. Les constats, suite aux entretiens avec les développeurs, sont développés dans les paragraphes suivants.

Il est à noter que ces informations, pour chaque typologie de système, ont pu être approfondis plus tard dans l'étude et qu'elles sont disponibles dans les fiches techniques récapitulatives des dix systèmes étudiés (voir le livrable « Recueil de retours d'expériences et fiches techniques récapitulatives »).

4.5.3.1. Les Centrales au sol : produire de l'énergie compétitive avec des centrales au sol tout en se positionnant comme un aménageur du territoire

Approche

Les projets de centrales au sol ciblent essentiellement le modèle de production d'une énergie compétitive recherchant des économies d'échelles avec l'ambition de développer des parcs de grande taille. Jusqu'à présent, ces parcs se sont majoritairement développés sur des terrains dégradés. Les acteurs envisagent maintenant de développer des projets via PPA, considérant que les AO CRE limitent les puissances pouvant être atteintes ou l'association avec une activité agricole.

Les développeurs tentent de mettre en place des projets plus « ancrés » dans les territoires en revendiquant ainsi le montage de « projets de territoires » plutôt que des projets énergétiques ou agricoles. L'accent est, par exemple, mis sur la pérennisation de l'installation d'un jeune agriculteur ayant des difficultés à trouver du foncier répondant à ses besoins (et à des coûts acceptables), la redynamisation ou le maintien d'une chaîne de valeur agricole qui va au-delà de la simple activité agricole (outils de transformation, de restauration, etc.). Pour justifier le bien-fondé de leurs démarches, les développeurs se positionnent alors comme des aménageurs et médiateurs sur la durée, capable de concilier les enjeux de chacun.

Modèle d'affaire

Les modèles d'affaires sont plutôt très peu variés. Généralement, les centrales candidatent à l'AO CRE. Lorsqu'elles sont inéligibles, le recours au PPA est envisagé mais seul un des développeurs interrogés a aujourd'hui contractualisé un PPA. Les développeurs de centrales au sol financent généralement les infrastructures nécessaires à l'activité (local apicole, bâtiments, bergerie, arrivée d'eau).

Un schéma classique de modèle d'affaire pour les centrales au sol est représenté ci-dessous :

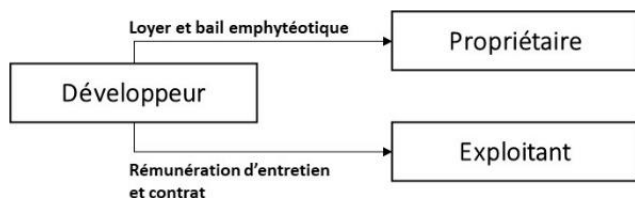


Figure 38 : Principe général du modèle d'affaire liés aux centrales au sol sur terrain agricole

Le propriétaire reçoit un loyer (plus ou moins élevé) et signe un bail emphytéotique avec le développeur.

L'exploitant agricole contractalise sur une durée variant de 5 à 18 ans et reçoit une rémunération d'entretien sous modules, d'environ 500€ en moyenne. Il a pour obligation dans son contrat d'assurer une production agricole dans le parc photovoltaïque.

Méthode de développement

Les développeurs mettent en place un Appel à Manifestation d'Intérêt auprès des agriculteurs pour choisir les projets pertinents (économiquement viable notamment) et dimensionnent le projet photovoltaïque avec les candidats retenus. Des partenariats avec les Chambres d'Agricultures sont souvent engagés pour accompagner la construction du projet.

4.5.3.2. Les serres et ombrières : apporter un service visant à améliorer la valeur économique des produits agricoles.

Approche

L'objectif est de développer des systèmes photovoltaïques uniquement s'il y a un intérêt pour la culture (amélioration du rendement ou de la valeur). Il s'agit de répondre à une problématique agricole et climatique grâce à la haute technologie et à l'innovation, quitte à accepter une dégradation du rendement électrique ($\approx 650 \text{ KWc/ha}$). Les développeurs concernés par ce type de projets se positionnent en fournisseur d'outil et de service agricole : adaptation au changement climatique, amélioration de la qualité des produits...

Modèle d'affaire

Concernant les serres, les modèles d'affaires les plus courants mettent en œuvre un financement de la serre par le développeur après candidature à l'AO CRE Bâtiment avec une rémunération du propriétaire sous forme de loyer (cas de la majorité des serres développées il y a plusieurs années – 2009 à 2012), une mise à disposition gratuite pour l'exploitant (obtention d'un outil « gratuit ») et une rétrocession à partir de 30 ans.

Les systèmes d'ombrières, encore en phase expérimentale, n'ont pas encore de modèle d'affaire stabilisé. Ces types de projet ne proposent généralement pas de loyer au propriétaire, ni de rémunération à l'exploitant, considérant que l'agriculteur trouve un bénéfice agronomique à la présence de l'outil. A terme, et notamment pour les ombrières dynamiques, un modèle d'affaire se dégage sur la base d'un schéma à trois acteurs :

- le développeur serait l'investisseur,
- l'agriculteur serait l'exploitant,
- et un prestataire de service serait en charge du pilotage des modules photovoltaïques et ainsi, garant de la synergie agricole.

Dans ce cadre, une participation financière pourrait alors être demandée à l'agriculteur pour bénéficier du service de pilotage.

Méthode de développement

Les développeurs peuvent utiliser trois voies de développement de leurs projets :

7. L'AO CRE bâtiment pour les serres classiques ;
8. L'AO CRE Innovation pour les serres et ombrières agrivoltaïques ;
9. la recherche lorsque les projets sont très expérimentaux ou basés sur le recours à des suivis et capteurs de haute technologie pour anticiper les besoins des productions et garantir la priorisation à l'agriculture. Les démonstrateurs sont pour le moment, financés par des subventions : ADEME, régionales (Région Occitanie particulièrement) et certains projets ne sont pas encore raccordés (simulation de la production seulement).

4.5.4. Synthèse des systèmes développés et de leurs modèles d'affaires

L'observation des systèmes existants ou en projets en France et du mode de valorisation de l'électricité produite renseigne sur les performances économiques (et donc énergétiques) de ces systèmes et ainsi, sur les compromis acceptables par les développeurs.

Il est à noter que ces informations, pour chaque typologie de système, ont pu être approfondis plus tard dans l'étude et qu'elles sont disponibles dans les fiches techniques récapitulatives pour les dix systèmes étudiés (voir le livrable « Recueil de retours d'expériences et fiches techniques récapitulatives »).

Ces informations sont résumées dans le tableau ci-dessous.

	Centrale PV au sol		Ombrières PV		Serres PV	PV sur bâti
Précision sur type d'installation			Grande structure	Petit outil agricole		
Cultures agricoles couplées	Prairies pâturées	Autres cultures	Vignes, Vergers, Maraîchages		Vergers, Maraîchages	NA
Niveau de développement	En exploitation	En projet	En expérimentation	En exploitation	En exploitation	En exploitation
Cadre de la vente de PV	AO CRE ou PPA	AO CRE ou AO CRE innovation	AO CRE innovation	AO CRE innovation ou tarif de rachat (si PV)	AO CRE bâtiment	AO CRE bâtiment
Modalité de contractualisation en exploitation	Contractualisation d'entretien du parc avec un agriculteur Bail emphytéotique avec le propriétaire		Pas de loyer Pas de modèles d'affaires stabilisés car expérimentation Rétrocession de l'outil après 30 ans		Loyer pour le propriétaire Mise à disposition gratuite pour l'exploitant Rétrocession à partir de 30 ans	
Contraintes sur la performance économique et sur la production PV	Peu ou pas de contrainte par l'agriculture	Contraintes importantes (notamment d'écartement) nuisant à la performance du PV	Contraintes importantes (notamment d'écartement) nuisant à la performance du PV	Faible importance du PV dans le système.	Faible contrainte de l'agricole sur la performance PV	Pas de contrainte spécifique à l'activité agricole (sauf interdiction de stockage de produits inflammables)
Partenariats possibles	Chambre d'Agriculture, IDELE, FNO, INAO		INRAE, CTIFL, Chambres d'Agriculture			

Tableau 18: Synthèse des systèmes : développement, cadre de rémunération de l'électricité PV et modalités de contractualisation

4.5.5. Suivis et retours expérimentaux

Globalement, il n'y a pas ou très peu de suivi agricole organisé. Comme il ne s'agit pas d'une obligation réglementaire, la majorité des développeurs interrogés ne considèrent pas nécessaire d'organiser un suivi expérimental. La plupart des acteurs évoquent des échanges plus ou moins réguliers avec les exploitants/propriétaires et l'observation de photos des productions sous installations. Les entretiens montrent toutefois que les développeurs ont pris conscience récemment de l'importance de collecter des données, notamment pour justifier de la plus-value de leurs projets pour l'agriculture locale et les territoires. Ainsi, plusieurs développeurs interrogés mettent actuellement en place ou réfléchissent à mettre en place un dispositif de suivi de l'activité agricole, sans toutefois parler des dispositifs expérimentaux (qui requièrent des parcelles témoins à minima).

Quelques développeurs ont néanmoins déjà mis en place des dispositifs de suivi avec des organismes de recherche (protocoles de mesures scientifiques) ou avec des organismes techniques des filières agricoles concernées (Chambre d'Agriculture, IDELE, FNO, CTIFL, INAO...).

La mise en place d'un suivi peut prendre différentes formes et nécessiter donc plus ou moins de temps pour les mettre en place et des investissements parfois très différents. Les suivis peuvent prendre la forme d'analyses parcellaire de la reprise des cultures sous les modules (passages saisonniers, récoltes de données précises et analyses statistiques) mais aussi d'analyse annuelle des performances des exploitations concernées (bilans comptables, analyse des filières de valorisation). A ce jour, l'hétérogénéité des modèles rend difficile la généralisation de ces suivis.

Ainsi tous les développeurs soulignent le manque de retours d'expériences et le besoin de constituer un observatoire des pratiques agricoles sous photovoltaïque, avec des résultats quantitatifs.

4.5.6. Attentes et difficultés soulevées par les développeurs

4.5.6.1. Les difficultés d'instruction : la crainte d'un précédent par les services de l'état lors de l'évaluation du permis de construire

Les développeurs interrogés font le constat que localement, des projets ont dégradé la confiance et les relations avec les services de l'état et les acteurs agricoles. Les projets dits « alibis » prétendent construire un projet agricole dans l'emprise des centrales (et/ou des serres) mais lorsque ces derniers sont construits, les retours d'expériences montrent que les agriculteurs ont arrêté l'activité au bout de 2-3 ans pour des raisons non anticipées (mauvais dimensionnement, mauvais résultats, trop éloigné des technicités des autres cultures, trop chronophage, etc.) et que l'activité photovoltaïque est la seule à être maintenue sur la durée alors qu'elle n'aurait pas été autorisée seule.

Les premiers projets non aboutis, mal dimensionnés aux besoins des territoires ou prévoyant des objectifs difficiles à atteindre viennent polluer les démarches actuelles et rendent difficile, sur ces territoires ayant vécu un précédent, la proposition de projets se voulant plus vertueux.

Une méfiance des CDPENAF face à ces projets et des hétérogénéités fortes d'appréciation entre territoires et régions sont constatés avec des objectifs de résultats attendus. Les développeurs regrettent les positions des services instructeurs qui attendent des données validées sans accepter l'expérimentation.

4.5.6.2. Le manque d'ingénierie adaptée et des engagements attendus par rapport aux incertitudes sur la viabilité des modèles d'affaires

Une installation photovoltaïque doit être dimensionnée dans sa structure, comme dans son modèle d'affaire, sur une durée de 30 ans en moyenne, à partir de paramètres connus à l'instant « t0 ». Or, pendant ce laps de temps, l'activité agricole peut subir des changements importants : rotation et temps de repos des productions, modification des ateliers de l'exploitation (arrêt de l'élevage lait pour viande ou arrêt de l'élevage vers de la culture), diversification de l'exploitation, voire départ en retraite et transmission à une autre exploitation (ou installation). L'activité agricole est mouvante et doit s'adapter

aux conditions climatiques comme aux conditions socio-économiques et il est difficile d'anticiper ces mutations, et donc ses conséquences sur le système photovoltaïque sur terres agricoles.

Certains développeurs anticipent de potentielles modifications de l'activité agricole avec une analyse des degrés de mutation de l'exploitation attendus (passage de productions plein-champs à serriste, passage d'un système élevage ovin viande à lait, conversion à l'agriculture biologique forcée) mais cela reste en marge des méthodes de développement générales.

Les aspects techniques et juridiques sont difficiles, tant pour un projet photovoltaïque que pour un projet agricole et la complexité est renforcée par l'association des deux. Les développeurs constatent un manque ou une insuffisance d'ingénierie pour les aider à fixer des objectifs économique et agronomique adaptés et répartir les engagements entre les différentes partie-prenantes.

4.5.6.3. Des conditions règlementaires posant question

Dans le cadre des projets déposés à l'AO CRE innovation, les développeurs ne savent pas si les clôtures à venir autoriseront la candidature d'une installation similaire à une installation déjà lauréate à une session précédente. Autrement dit, une innovation retenue une année pourrait-elle être considérée comme toujours innovante à l'AO suivant ?

De plus, les cahiers des charges de l'AO CRE fixent des calendriers pour la réalisation des travaux et des contraintes qui ne sont pas forcément adaptées aux conditions d'intervention agricole. Par exemple, les travaux sont potentiellement demandés alors que les terres sont engorgées et que le passage des engins va déstructurer les sols pour les semis ou plantations à venir.

4.5.6.4. La question paradoxale de l'artificialisation des sols

La majorité des développeurs regrettent que les centrales au sol soient considérées comme une consommation de terres agricoles et une diminution de la Surface Agricole Utile (SAU) du territoire même si elles sont valorisées par un cheptel représentatif des systèmes d'exploitation agricoles du secteur.

Les conséquences sont lourdes pour l'agriculteur concerné puisque ce dernier se voit refuser pour partie les subventions de l'Europe via la Politique Agricole Commune (PAC). En effet, les aides liées au foncier, dites Droit au Paiement de Base (DPB), ne seront plus délivrées, ce qui représente une perte de l'ordre de quelques centaines d'euros par hectare alors que les aides liées au cheptel ou à la conversion en agriculture biologique seront maintenues (dizaines d'euros par tête d'ovins par exemple et MAEC).

4.5.6.5. Un manque de vision commune sur l'agrivoltaïsme

Les activités chez les développeurs ont beau se concentrer sur la production d'énergie renouvelable à partir du solaire, les technologies sont très variées et les méthodes de développement et de modèles d'affaires sont nettement distinctes, qu'il s'agisse d'une centrale au sol, d'une ombrière ou d'une serre photovoltaïque. Pourtant, le terme agrivoltaïsme semble employé pour chacun des modèles avec des visions parfois divergentes quant aux bonnes pratiques à adopter pour aboutir à des installations à succès.

4.5.7. Autres démarches recensées

Au-delà des éléments recueillis pendant les interviews des développeurs, des initiatives et démarches spécifiques de la filière ont été recensées et sont présentées dans ce paragraphe.

4.5.7.1. Un rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques sur « L'agriculture face au défi de la production d'énergie »

Le rapport « L'agriculture face au défi de la production d'énergie⁴¹ » publié en juillet 2020 met en avant le rôle essentiel que le secteur agricole joue dès à présent et pourra jouer (plus fortement) dans les années à venir pour la production d'énergie renouvelable. A ce titre, et spécifiquement pour les projets photovoltaïques, les auteurs recommandent « *d'utiliser le levier des seuils des appels d'offre et des guichets ouverts et de soutenir l'agrivoltaïsme, en vue d'éviter l'artificialisation des sols et recourir le plus possible aux technologies innovantes comme l'intelligence artificielle.* »

4.5.7.2. Des recommandations du SYNALAF

Le Syndicat National des Labels Avicoles de France a publié en 2020 des recommandations concernant l'implantation de panneaux photovoltaïques sur parcours de volailles de chair Label Rouge, IGP et biologiques.

Le document publié permet ainsi de définir la position de la filière avicole sous signes officiels de la qualité et de l'origine (SIQO) concernant la possibilité de mettre en place des dispositifs de production d'électricité photovoltaïque sur les parcours de volailles de chair sous SIQO.

Le SYNALAF mentionne les sept points suivants :

1. La production d'énergie ne doit pas être l'objet premier de la production de l'atelier avicole. Les projets ne doivent pas mettre en cause la primauté du caractère agricole du parcours conféré par l'élevage de volailles de chair Label Rouge, IGP ou biologique ;
2. La surface cumulée du parc de panneaux / trackers mobiles / ombrières photovoltaïques [NDLR : ci-après dénommés « panneaux photovoltaïques »] doit représenter au maximum 10 % de la surface du parcours. Les panneaux photovoltaïques ne sont pas assimilés à des arbres garantissant de l'ombrage. Un parcours doit réglementairement rester « majoritairement herbeux et arboré ».
3. Chaque panneau photovoltaïque ne doit pas dépasser, en longueur et en largeur, les dimensions du bâtiment de l'atelier, pour les bâtiments d'une superficie de plus de 150 m².
4. Deux panneaux photovoltaïques doivent être espacés d'au moins deux fois la plus grande dimension d'un panneau photovoltaïque.
5. Les panneaux photovoltaïques ne doivent pas être installés à moins de 20 mètres devant les trappes des bâtiments de volailles.
6. L'entièreté du parcours doit être accessible aux volailles et pour les travaux d'entretien. La hauteur des panneaux photovoltaïques doit assurer une bonne pousse de l'herbe. La hauteur entre le sol et le bord le plus bas du panneau photovoltaïque doit être de 1,80 mètre minimum.
7. L'éleveur est fortement encouragé à être investisseur dans le projet et à en porter les capitaux, en étant si possible propriétaire des outils photovoltaïques et en évitant le recours aux baux emphytéotiques, particulièrement contraignants pour la viabilité économique et la transmission de son entreprise agricole. (Ces recommandations valent pour l'énergie revendue au réseau de distribution et à celle utilisée en autoconsommation).

⁴¹ Rapport « L'agriculture face au défi de la production d'énergie », OPECST, R.Courteau & JL Fugit, juillet 2020 : <http://www.senat.fr/rap/r19-646/r19-6460.html>

Comme mentionné dans le document du SYNALAF, il est important de rappeler que « ces recommandations ne sauraient se substituer aux prescriptions spécifiques contenues dans les documents d'urbanisme de certaines collectivités territoriales et plus généralement à toute règle émise par une agglomération, une communauté de commune, un département, une région, etc. à l'encontre du développement de projets photovoltaïques sur un territoire donné ».

4.5.7.3. Sondage IFOP pour PHOTOSOL

Par exemple, un sondage IFOP commandité par PHOTOSOL a été réalisé auprès d'un échantillon de 2002 personnes, représentatif de la population française âgée de 18 ans et plus. La représentativité de l'échantillon a été assurée par la méthode des quotas (sexe, âge, profession de l'interviewé) après stratification par région et catégorie d'agglomération. Les interviews ont été réalisées par questionnaire auto-administré en ligne du 15 au 20 janvier 2020.

Dans ce sondage, le photovoltaïque sur terres agricoles a été abordé. Les résultats montrent que le concept « agrivoltaïque » est méconnu mais bien accueilli. Les résultats de ce sondage montrent notamment qu'« à priori, un terrain agricole n'est pas, aux yeux des personnes favorables à l'installation d'un parc sur leur commune, un lieu à privilégier pour l'infrastructure. Les interviewés lui préfèrent de loin des zones inexploitées telles les friches industrielles ou militaires (1^{ère} solution sur les 7 proposées) ou les anciennes carrières (2^{ème}).

Toutefois, à la question de savoir s'ils seraient favorables à l'installation d'un parc sur le sol de friches agricoles non exploitées, trois quarts des Français répondent par la positive (75%) et en particulier les interviewés ayant déjà remarqué des modules au sol dans les champs de leur commune (82%).

Plus encore, une fois informés de ce que constitue l'agrivoltaïsme, 80% des interviewés font part de leur approbation au recours de cette pratique sur les terres agricoles au sein de leur commune (20% y étant même très favorables). De telle sorte que, bien que méconnu du grand public (23% des Français en ont déjà entendu parler mais seuls 5% affirment savoir précisément ce dont il s'agit), l'agrivoltaïsme semble séduire immédiatement. »

A l'instar des questions précédentes, les 18-24 ans apparaissent plus au fait que leurs aînés (33% ont déjà entendu parler de l'agrivoltaïsme vs 23% en moyenne) et plus enclins à sa pratique (30% y sont très favorables vs 20%). Ils sont rejoints dans leur enthousiasme par les personnes témoignant d'une plus grande sensibilité environnementale (32% sont très favorables). »

Les résultats obtenus lors de ce sondage sont résumés dans les figures ci-dessous :

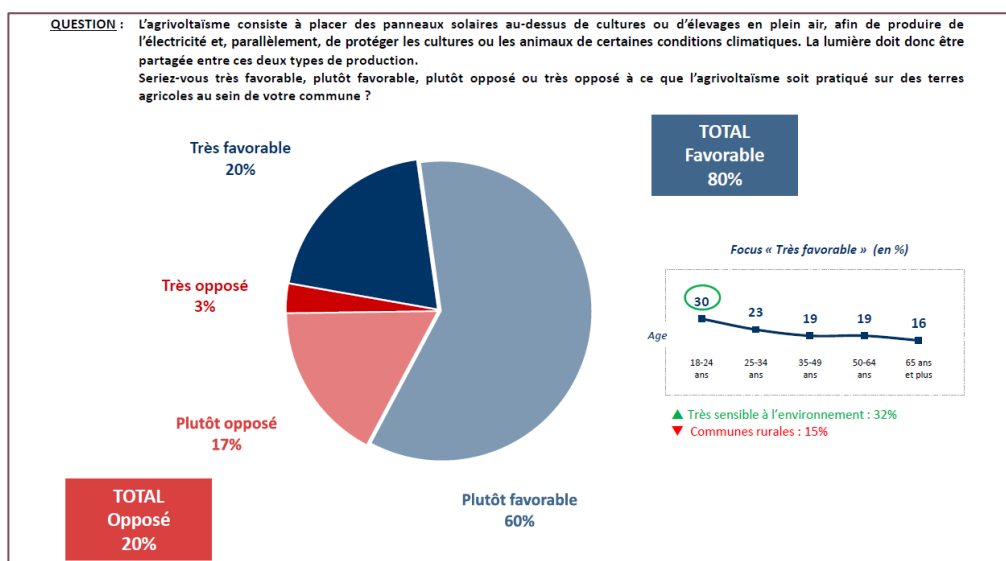


Figure 39: Présentation des résultats du sondage sur l'adhésion à la pratique de l'agrivoltaïsme sur des terres agricoles au sein de sa commune⁴²

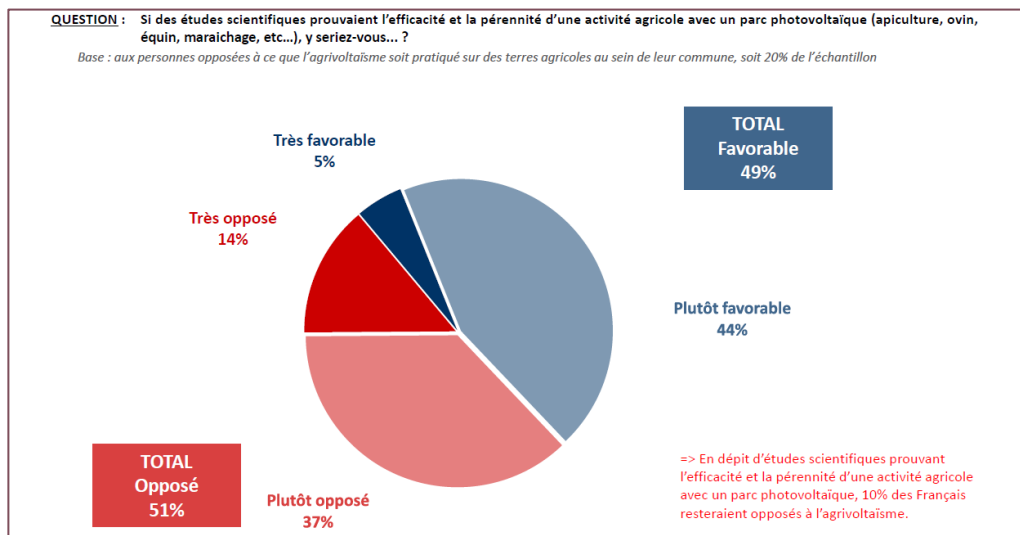


Figure 40: Présentation des résultats du sondage sur l'adhésion à la pratique de l'agrivoltaïsme si des études prouvaient l'efficacité et la pérennité de l'activité agricole⁴³

4.5.7.4. Un guide des bonnes pratiques de l'agrivoltaïsme de la Plateforme Verte

La Plateforme Verte rassemble des acteurs de tout horizon pour permettre l'accélération de projets au service de la transition énergétique. Elle a mis en place sept groupes de travail dont l'un se focalise spécifiquement sur l'agrivoltaïsme. Suite à deux séminaires « Agriculture et solaire » organisés les 5 novembre 2019 et 7 février 2020, la Plateforme Verte doit sortir prochainement un guide des bonnes pratiques de l'agrivoltaïsme avec des recommandations à l'intention des parties prenantes.

4.5.7.5. A l'échelle européenne, un guide de Solar Power Europe

Solar Power Europe (SPE) est une association européenne regroupant les principaux producteurs d'énergie solaire. En 2021, SPA a publié plusieurs documents relatant les bonnes pratiques liées au développement de l'énergie solaire. Parmi ces documents, un « Guide de l'agrisolaire »⁴³ propose les avantages du photovoltaïque sur terrain agricole, une présentation d'exploitations considérées comme « exemplaires » et une liste des bonnes pratiques à généraliser.

Selon ce guide, les avantages des installations photovoltaïques sur terrains agricoles sont qu'elles permettent :

- Une meilleure efficacité de l'eau ;
- Une amélioration de la qualité des sols (lors de l'implantation en terrains dégradés) ;
- Une réduction de l'utilisation de plastique pour les installations qui remplacent des protections plastiques ;
- Une amélioration de la productivité agricole (notamment pour les plantes sensibles à la lumière) ;
- Un moyen de favoriser des méthodes durables de contrôle des parasites et nuisibles car elles servent de support à l'installation de filets de protection notamment ;
- Une opportunité de créer des emplois dans des zones rurales.

⁴² IFOP, 2020. Les français et le photovoltaïque, sondage pour Photosol

⁴³ SolarPower Europe, 2021. Agrisolar Best Practices Guidelines Version 1.0

Pour SPE, les projets « agrivoltaïques » sont des projets « agrisolaires » où le site d'implantation est partagé entre installation photovoltaïque et activité agricole et où le partage de la lumière est optimisé en quantité et en qualité.

Afin de s'assurer que les projets ont des impacts positifs, SPE propose de mettre en place une évaluation et une classification des projets agrisolaires, par une tierce partie indépendante, sur la base d'un document technique relatif au projet

Les projets « agrisolaires » sont ceux qui respectent des exigences minimales dans différentes dimensions (agriculture, environnement, aspects socio-économiques, et suivi et collecte d'information). En répondant à des critères optionnels (« should criteria », voire « could criteria ») dans ces différentes dimensions, ces projets peuvent passer en catégorie « deux étoiles » ou « trois étoiles », classification des projets les plus performants.



Figure 41: Classification des projets photovoltaïques sur terrains agricoles selon le document Solar Power Europe

Pour permettre cette évaluation, le document d'évaluation doit décrire le couple « système agricole – installation photovoltaïque », appelé « Sustainable Agricultural Concept » (SAC), détailler la structure du projet de manière précise, ainsi que l'ensemble des impacts agronomiques, socio-économique et environnementaux du projet, au cas par cas selon les projets.

Les conditions suivantes devront être respectées :

- Pas de conflit avec l'utilisation actuelle des terres et la viabilité de l'activité agricole ;
- Viabilité économique du projet pour l'ensemble des parties ;

Les critères retenus par le guide de Solar Power Europe sont les suivants :

	Critères obligatoires : 1 étoile	Critères optionnels : 2 étoiles	Critères optionnels : 3 étoiles
Dimension 1 : Agriculture	<ul style="list-style-type: none"> - Proposer un document décrivant le concept du couplage photovoltaïque – production agricole (concept « SAC »), qui contient : l'évaluation des besoins des parties prenantes, le détail des informations sur l'activité agricole et le système PV (détails techniques), les informations sur les types de sol de la parcelle du projet, l'évaluation de l'équipement et des machines ; - De répondre aux besoins de l'activité agricole tout en permettant de produire de l'électricité. 	<ul style="list-style-type: none"> - Démontrer des synergies entre le PV et l'agriculture ; - Evaluer la distribution de la lumière et les conditions microclimatiques ; - Prévoir un dispositif de gestion de l'eau. 	<ul style="list-style-type: none"> - Maximiser les synergies entre le photovoltaïque et l'agriculture. - Amélioration de la résilience économique de l'activité agricole
Dimension 2 : Environnement	<ul style="list-style-type: none"> - Évaluation des impacts environnementaux du projet (selon des normes standardisées) - Évaluation des impacts sur l'érosion des sols, l'ensablement des sols, évaluation de la disponibilité de l'eau. 	<ul style="list-style-type: none"> - Respect des normes minimales de préservation des sols pendant la construction et le démantèlement ; - Technique efficace, dégradabilité des structures. - Approche du cycle de vie - Transition de la biodiversité, pratiques agricoles plus durables. 	<ul style="list-style-type: none"> La fourniture de services d'écosystèmes. - Augmentation de la biodiversité mesures "guide BNE" (pas de pesticide, semences locales). - Régénération des sols et capture carbone
Dimension 3 : Socio-économique	<ul style="list-style-type: none"> - Description du modèle d'affaires pour le projet ; - Évaluation des conditions de travail, et en particulier les conditions de sécurité. 	<ul style="list-style-type: none"> Analyse des économies financières à vie de remplacement des matériaux à courte durée de vie. - Impacts sur la chaîne d'approvisionnement locale considérée. 	<ul style="list-style-type: none"> Plan d'action local intégrant les points de vue et les intérêts des communautés locales. - Mise en place/Intégration au sein de l'agriculture locale et communauté des énergies renouvelables.
Dimension 4 : Suivi et collecte d'informations	<ul style="list-style-type: none"> - Suivi des performances du système. 	<ul style="list-style-type: none"> - Collecte de données sur la performance (agricole, environnementale, énergétique, socio-économique) 	<ul style="list-style-type: none"> - Évaluation détaillée de la performance des services et socio-économiques fournis

Tableau 19: Critères de définition de l'« agrisolaire » d'après le guide Solar Power Europe

Par ailleurs, ce guide s'articule avec d'autres documents, et entre autres le guide de bonnes pratiques de durabilité des installations photovoltaïque⁴⁴. Ce document n'est pas spécifique au photovoltaïque sur terrains agricoles, et concerne l'ensemble des problématiques environnementales en lien avec le photovoltaïque (impact carbone, recyclage des panneaux, bonnes pratiques de mise en place, exploitation et démontage des projets...).

4.5.7.6. Autres initiatives

D'autres initiatives ont été recensées, comme la rédaction d'un référentiel pour une certification agrivoltaïque AFNOR porté par SUN'R.

Par ailleurs, plusieurs développeurs photovoltaïques (Sun'Agri, REM Tec, Kilowattsol, Altergie Développement et Râcines) ont créé une association professionnelle afin de structurer la filière et défendre les intérêts de l'agrivoltaïsme⁴⁵.

5. Cadres réglementaires du développement du photovoltaïque sur terres agricoles à l'international et enseignements préliminaires

5.1. Méthodologie

Ces dernières années, l'agrivoltaïsme s'est développé de manière très dynamique au niveau mondial : la capacité installée est passée d'environ 5MW en 2012 à 2.9 GW en 2018 (Fraunhofer ISE 2018), avec un total de 2200 projets dans le monde (Schindele et al. 2020).

Cette augmentation a été le résultat de politiques de soutien à l'agrivoltaïsme, en particulier au Japon, en Chine, et aux USA. Le cadre réglementaire et juridique de pays connaissant un développement d'intérêt de l'agrivoltaïsme a ainsi été réalisé : le Japon, la Chine, les Etats-Unis, l'Allemagne et l'Italie. Un focus sur La Vietnam, pays au climat en partie tropical a également été étudié, dans le but de tirer des enseignements potentiellement plus adaptés au cas des ZNI français.

Pour chaque pays, ont été analysés :

- (i) les dispositions réglementaires du photovoltaïque sur terres agricoles,
- (iii) les conséquences des dispositifs en matière de développement du photovoltaïque sur terrains agricoles.

5.2. Japon

5.2.1. Dispositions réglementaires du photovoltaïque sur terres agricoles

5.2.1.1. Mesures générales de soutien du photovoltaïque, accessibles au photovoltaïque sur terres agricoles

Le Japon soutient le développement du photovoltaïque à travers plusieurs instruments politiques :

- Des tarifs de soutiens (Feed-in-Tariffs). Ceux-ci s'élevaient à un montant de 18 JPY/kWh (15 cts €/kWh) pour l'exercice 2018 (YAMAZAKI et IKKI 2018b).
- La loi RPS, mise en place depuis 2003. Celle-ci demande aux entreprises de réseau d'atteindre un certain ratio minimum d'énergie alternative dans la puissance totale vendue, et a constitué l'une des principales incitations à la diversification des sources d'électricité au Japon. Cette loi précise que ces droits peuvent être échangés sous la forme de green certificates.

⁴⁴ SolarPower Europe, 2021. Solar Sustainability Best Practices Benchmark

⁴⁵ J. Spaes, 2021. Création de « France Agrivoltaïsme » pour structurer la filière, pv-magazine.fr

5.2.1.2. Mesures spécifiques de soutien au photovoltaïque sur terres agricoles

5.2.1.2.1. Une conversion temporaire en terrains non agricoles

Au Japon, l'installation de modules solaires sur terrains agricoles nécessite leur conversion temporaire en « terrains non agricoles », et ceci, peu importe la taille des installations photovoltaïques. Cette nomenclature foncière est définie par la loi Agricultural Land Act, en place depuis 1952.

En 1969, la loi sur les zones de promotion agricoles (LCAPA) oblige les autorités locales à préparer un plan régional de soutien à l'agriculture. Ce plan intègre un zonage des « Exclusive Agricultural Areas » (EAA), où la conversion des terrains agricoles en terrains non agricoles est interdite (OCDE 2009). Les terres situées dans les zones EAA bénéficient également de régimes de taxes préférentiels et de subventions agricoles spécifiques. Ce zonage est défini par les municipalités et répond aux objectifs de développement agricole locaux.

A titre indicatif, 87% des terres agricoles se trouvaient à l'intérieur de ce zonage en 2005, ce qui a fortement limité le développement d'installations photovoltaïques sur terrains agricoles (YAMAZAKI et IKKI 2018a).

5.2.1.2.2. Depuis 2013, une autorisation des conversions temporaires des terrains EAA pour l'agrivoltaïsme

En Mars 2013, le Ministère de l'Agriculture, de la Forêt et de la Pêche (MAAF) a publié un communiqué (N° 2657) visant à promouvoir le développement de l'agrivoltaïsme. **Nommé « solar sharing », il est défini de la façon suivante : « une installation photovoltaïque sur des terres agricoles avec une continuité des activités agricoles »** (Ministère de l'Agriculture, de la Forêt et de la Pêche 2018a).

En pratique, seules les installations respectant les critères suivants sont autorisées : la quantité de lumière arrivant aux plantes doit être suffisante pour permettre leur développement et la qualité des produits ne doit pas subir de détérioration significative, ce qui se traduit par des rendements qui doivent rester supérieurs à 80% de la moyenne annuelle. Par ailleurs, la hauteur des structures photovoltaïques doit être supérieure à 2 m pour laisser passer les machines agricoles (Ministry of Agriculture, Food and Forestry 2018).

Ce communiqué autorise les exploitants qui respectent les critères ci-dessus à obtenir des permis de conversion temporaire de leurs terres agricoles en terrains non-agricoles, qu'elles appartiennent ou non aux zones EAA. **Ces conversions temporaires ont une durée de 3 ans renouvelables, à condition que les contraintes de hauteur des modules et de rendements soient bien respectées. Des rapports annuels sont requis par les administrations locales.**

Les demandeurs de ces permis de conversion doivent obligatoirement être des agriculteurs ou des sociétés agricoles. Elles sont approuvées par les comités agricoles de chaque région.

Par ailleurs, les projets agrivoltaïques situés en zones EAA bénéficient des régimes de taxes préférentiels et des subventions agricoles propres à ces zones.

5.2.1.2.3. Allongement de la période de conversion temporaire pour la promotion de l'agrivoltaïsme sur certaines terres agricoles

A partir de 2017, différents textes réglementaires mentionnent la volonté politique de développer l'agrivoltaïsme, sans toutefois donner d'objectif chiffré spécifique. Le Parti Démocratique a publié une note en 2017 sur sa volonté de promouvoir l'agrivoltaïsme, tandis que celle-ci a été introduite dans la stratégie « Investissements pour l'avenir 2017 » qui a été approuvée par le cabinet en juin 2017. En 2018, le Fifth Basic Environment Plan de 2018 (Ministère de l'Environnement 2018) fait mention de l'agrivoltaïsme, en particulier pour l'autoconsommation.

Enfin, en Mai 2018, le Ministère de l'Agriculture a publié un Avis (n°78) qui a assoupli la réglementation et a prolongé la durée de l'autorisation de conversion des terres agricoles pour les installations photovoltaïques de 3 à 10 ans (Ministère de l'Agriculture, de la Forêt et de la Pêche 2018a) pour certaines terres agricoles :

- Zones agricoles « dévastées », peu importe leur appartenance aux EAA
- Zones agricoles hors EAA de type 2 ou de type 3 (en zones urbaines ou à proximité des zones urbaines)
- Zones agricoles hors EAA si le porteur du projet photovoltaïque est le propriétaire des terres et exerce lui-même une activité agricole

Les zones agricoles dites « dévastées » sont définies par le Ministère de l'Agriculture comme « n'étant pas réellement cultivées, et qui ont été dégradées en abandonnant la culture, et où il est objectivement impossible de faire pousser des cultures par un travail agricole normal ». Chaque année, le ministère organise des enquêtes de terrain qui définissent ce zonage.

Les terres agricoles de type 2 et de type 3 font référence à des documents d'urbanisme, équivalents des PLU français. Les zones de type 3 sont des surfaces urbanisées : localisées à moins de 500 m de conduites d'eau ou de gaz enterrées, de gares ou de bâtiments officiels, ou bien dans des zones rurales où plus de 40% des surfaces sont constructibles. Les zones de type 2 sont situées à moins de 500 m des zones de type 3.

5.2.1.2.4. Budget alloué

En 2013, le ministère de l'Agriculture, des Forêts et de la Pêche a alloué 1 853 millions de yens (15,9 millions €) à la promotion de l'introduction des énergies renouvelables. Des subventions pour les projets pilotes en agrivoltaïsme en faisaient partie (Ministère de l'Agriculture, de la Forêt et de la Pêche 2018c). En 2017, le MAFF a publié un communiqué encourageant les municipalités à mettre en place des soutiens financiers au niveau local.

Le Parti Démocratique japonais, actuellement au pouvoir, est en train de statuer sur le régime fiscal du foncier agricole, dans le cas où des projets agrivoltaïques sont en place. Il a annoncé vouloir introduire des subventions spécifiques à l'agrivoltaïsme lors d'une communication le 13 Février 2020 (Parti Démocratique 2020).

5.2.2. Situation actuelle des installations photovoltaïques sur terrains agricoles

5.2.2.1. Définition du « solar sharing »

Comme précisé précédemment, le Ministère de l'Agriculture, de la Forêt et de la Pêche (MAAF) a défini en 2013 l'agrivoltaïsme sous la dénomination de « **solar sharing** » : « **une installation photovoltaïque sur des terres agricoles avec une continuité des activités agricoles** ».

En pratique, seules les installations respectant les critères suivants sont autorisées : la quantité de lumière arrivant aux plantes doit être suffisante pour permettre leur développement et la qualité des produits ne doit pas subir de détérioration significative, ce qui se traduit par des rendements qui doivent rester supérieurs à 80% de la moyenne annuelle. Par ailleurs, la hauteur des structures photovoltaïques doit être supérieure à 2 m pour laisser passer les machines agricoles (Ministry of Agriculture, Food and Forestry 2018).

5.2.2.2. Types et nombre d'installations déployées

La définition d'une hauteur minimale de 2m interdit la mise en place de centrales au sol. On trouve ainsi des serres photovoltaïques et des ombrières.

Les cultures associées sont variables : riz paddy, soja, patates douces, thé par exemple. On trouve également (figues, myrtilles) sous ombrières, ainsi que toute sorte du maraîchage sous serres photovoltaïques (Ministère de l'Agriculture, de la Forêt et de la Pêche 2018b).



Figure 42 : Exemples d'ombrières PV au Japon (de gauche à droite : cultures de riz paddy, soja, thé



Figure 43 : Exemple d'une serre photovoltaïque au Japon, sur cultures hydroponiques de moutarde, pamplemousse, roquette, laitue et basilic

Bien qu'exclus de la définition de l'agrivoltaïsme, on trouve des modules photovoltaïques installés sur des étangs, des lacs et des zones d'aquaculture. Nommés modules photovoltaïques flottants (FPV), ils ne sont pas encore réglementés de manière spécifique (YAMAZAKI et IKKI 2018b).

Entre la mise en place de la loi sur l'agrivoltaïsme en 2013 et l'année 2017, il y a eu 1905 permis de conversion de terres agricoles pour la mise en place d'installations agrivoltaïques.

Année	Nombre de permis en cours	Surface (ha)
2013	96	19.4
2014	304	60.5
2015	374	72
2016	495	194.6
2017	636	135.3
Total	1905	481.8

Tableau 20 : développement des installations agrivoltaïques

Ces installations sont en général de petite taille : entre 5 et 20 ares, pour des puissances allant généralement de 50 à 110 kW.

5.2.2.3. Modèles d'affaires

Au Japon, différents modèles d'affaires sont autorisés et coexistent :

- Des agriculteurs propriétaires de leurs terres et seuls investisseurs des structures photovoltaïques.
- Des développeurs photovoltaïques qui louent des terres aux agriculteurs pour la mise en place des modules photovoltaïques. Les agriculteurs touchent des loyers fixes ou une partie de la vente d'électricité.
- Des entreprises privées qui achètent des terres et investissent dans des installations photovoltaïques. Il peut s'agir de développeurs photovoltaïques, mais aussi des entreprises agro-alimentaires. Elles ont alors recours à l'emploi de salariés pour maintenir l'activité agricole.

5.3. Etats-Unis

5.3.1. Dispositions réglementaires du photovoltaïque sur terres agricoles

5.3.1.1. Mesures générales de soutien du photovoltaïque, accessibles au photovoltaïque sur terres agricoles

Il existe de nombreuses mesures de soutien au photovoltaïque, mises en place à différentes échelles : nationale, étatique et parfois municipale. Le photovoltaïque sur terrain agricole, lorsqu'il est autorisé, est éligible aux mesures suivantes :

- Net Metering (comptage net ou facturation nette) : Cette politique oblige les fournisseurs d'électricité à se raccorder aux producteurs d'électricité photovoltaïque. Ces derniers déversent l'électricité qu'ils n'ont pas autoconsommée, donc leurs excédents de production sur le réseau. Ils peuvent ensuite retirer gratuitement de l'électricité à partir de ce même réseau, de manière différée en suivant leurs besoins : le réseau électrique joue ainsi un rôle de moyen de stockage gratuit pour le producteur.

En 2009, cette politique était mise en place dans 42 Etats (United States Department of Agriculture (USDA) 2011). En 2015, elle était encore largement appliquée, bien que certains Etats passent à d'autres politiques d'incitation à l'autoconsommation (Boff 2015).

- Renewable Portfolio Standard (RSP) : Il s'agit d'une fraction minimale que les distributeurs d'électricité doivent accepter à partir de sources renouvelables. Les producteurs d'énergie renouvelable certifiés obtiennent des certificats pour chaque unité d'électricité qu'ils produisent (appelés green certificates ou RECs) et peuvent les vendre en même temps que leur électricité aux entreprises d'approvisionnement. Ces dernières transmettent ensuite les certificats à un organisme de régulation pour prouver qu'elles respectent leurs obligations réglementaires.

En 2015, 29 Etats avaient mis en place cette politique (Boff 2015). En 2015, 10 Etats ont autorisé l'échange de ces droits (green certificates) entre distributeurs d'énergie renouvelables sur des marchés dédiés (Boff 2015).

- Les Feed-in-Tarifs (seulement 3 Etats concernés en 2015)
- Le MACRS (Modified Accelerated Cost Recovery System), qui permet aux producteurs d'énergies renouvelables d'amortir 50% de leurs investissements sur la première année, et le reste des 50% sur les 4 ans suivants.
- Les Crédits d'impôts à l'investissement (ITC) sur 30 % des dépenses liées à l'installation d'un système solaire après l'exclusion de toute partie subventionnée du projet, sans limite supérieure. Cette mesure a joué un rôle important dans le développement du solaire chez les agriculteurs (United States Department of Agriculture (USDA) 2011)
- Des exonérations d'impôts fonciers, excluant la valeur des installations solaires des valeurs imposables de la propriété (Romich et Hay 2019).

5.3.1.2. Mesures spécifiques de soutien au photovoltaïque sur terres agricoles

5.3.1.2.1. *Le principal programme de soutien au photovoltaïque en agriculture: le Rural Energy for America Program (REAP)*

Le Farm Bill de 2002 (Farm Security and Rural Investment Act) est le premier à faire mention de photovoltaïque en agriculture et à proposer des systèmes de soutien sous la forme de prêts et de subventions (USDA 2002). Il s'agit du Programme d'amélioration des systèmes d'énergie renouvelable et de l'efficacité énergétique (RESEIP), qui propose un soutien financier à la mise en place d'infrastructures

d'énergies renouvelables : solaire (photovoltaïque et thermique), éolien, méthanisation, biocarburants, hydroélectricité, hydrogène, géothermie et production d'électricité à partir des océans.

Ce programme est reconduit dans le Farm Bill de 2008 (le Food, Conservation and Energy Act) (Peterson 2008), sous le nom du Rural Energy for America Program (REAP). Il est administré par le programme d'affaires du Service des coopératives d'affaires rurales (RBS).

Les critères à respecter sont les suivants : le montant des subventions peut aller de 2500 \$ à 500 000 \$, avec un montant ne devant pas dépasser 25% du coût total des investissements. Des garanties de prêt sont également prévues pour diminuer le risque des investisseurs, qui remboursent une partie de l'argent emprunté en cas de défaut de paiement : jusqu'à 85 % du montant du prêt pour les prêts de moins de 600 000 dollars, descendant à 80 % pour les prêts entre 600 000 et 5 millions de dollars et à 70 % pour les prêts de 5 à 10 millions de dollars. Le total de ces deux aides est limité à 50% du montant total du projet en 2002, réhaussé à 75% par le Farm Bill de 2008.

5.3.1.2.2. Autres aides spécifiques aux agriculteurs

Les Value-added Producer Grant sont des subventions allouées à des agriculteurs pour encourager les productions à forte valeur ajoutée. Ce fond a bénéficié à la mise en place d'installations d'énergies renouvelables, mais d'avantage pour des installations éoliennes et de méthanisation que de photovoltaïque. Un maximum de 100 000\$ peut être alloué aux investissements et 300 000\$ pour le fond de roulement. Pour en bénéficier, il est nécessaire de prouver que ces investissements sont nécessaires à la production de produits à forte valeur ajoutée.

Dans le cadre d'expérimentations, quelques projets solaires ont également été financés via le programme pour la Recherche et l'Education pour l'Agriculture Durable (Sustainable Agriculture Research and Education), financé par le National Institute of Food and Agriculture (NIFA). Ces sources de financement varient entre 500 et 15 000\$ et ont financé une trentaine de projets entre 1994 et 2009 (United States Department of Agriculture (USDA) 2011). Le financement de projets solaires a été accordé à des systèmes en aquaculture, à l'abreuvement du bétail, à l'irrigation et au chauffage des serres.

La diversité des soutiens au photovoltaïque permet aux agriculteurs américains d'obtenir des montants importants de subventions pour la réalisation d'installations photovoltaïques. Ainsi, une étude de 2011 montrait que les subventions s'élevaient en moyenne à 44% du prix de l'investissement (United States Department of Agriculture (USDA) 2011).

5.3.1.2.3. Au Massachussets, d'autres aides spécifiques aux systèmes photovoltaïques en milieux agricoles

En 2018, le Massachussets est le premier Etat à avoir mis en place des subventions spécifiques aux systèmes photovoltaïques en milieu agricole (Schindele et al. 2020). Ce soutien se matérialise par un Feed-In-Tariff additionnel au prix de vente standard de l'électricité (supplément de 0,06 \$/kWh en plus du taux de base variant de 0.14 à 0.26 \$/kWh selon la taille du système et le fournisseur).

Pour en bénéficier, les installations solaires doivent avoir une puissance inférieure à 2 MW, une hauteur d'au minimum 8 pieds (2.44 m) pour les systèmes basculants et 10 pieds (3 m) pour les modules fixes. Pendant la saison de croissance des cultures, l'ombrage dû à la présence des modules photovoltaïques ne doit pas excéder 50%.

5.3.1.2.4. Des pénalités financières pour les terrains ayant souscrits à des servitudes de conservation

Aux Etats-Unis, il existe un mécanisme important de protection du foncier, appelé « Conservation easement », ou « servitude de conservation ».

Pour le propriétaire d'une terre, cela consiste à passer un contrat avec son Etat Fédéral (ou l'autorité compétente définie par l'Etat Fédéral). Le propriétaire s'engage sur le devenir du terrain, en échange de contreparties financières de la part des Etats : paiements directs ou régimes de taxes préférentiels (sur le foncier, le capital ou la succession des terres notamment). Ces servitudes sont souscrites de façon

volontaire par les propriétaires des terrains. Elles sont réversibles sous certaines conditions, prévues en amont dans les contrats. En 2014, la National Conservation Easement Database (NCED) avait décompté environ 105 000 servitudes de conservation aux Etats-Unis, représentant plus de 22,2 millions d'acres (soit près de 9 millions d'hectares).

Il existe un impact des servitudes de conservation sur la mise en place de modules photovoltaïques sur terrains agricoles, qui est toutefois difficile à analyser. En effet, il existe de nombreux contrats :

- Selon les objectifs poursuivis sur les terrains : maintien de zones de biodiversité, de zones de forêts, de la qualité de l'eau... et l'objectif de maintien de zones en agriculture.
- Selon les Etats Fédéraux : programmes différents, avec leurs propres mesures incitatives, leurs propres conditions d'éligibilité et leurs propres conditions de sortie des programmes.

Certains de ces programmes autorisent la mise en place de modules photovoltaïques, parfois sous conditions. D'autres programmes les interdisent, ce qui oblige les propriétaires à en sortir. Selon les Etats et les programmes considérés, cette sortie peut faire l'objet de sanctions financières importantes, ou non. La principale servitude de conservation s'appelle « Agricultural Assessment ». Il s'agit d'un impôt foncier basé, non pas sur la valeur du terrain, mais sur la valeur de la production agricole. Selon les Etats, la mise en place de modules photovoltaïques sur ces terres peut être interdite sous réserve d'une pénalité financière, ne pas impliquer de sanctions, voire être encouragé.

Le tableau ci-dessous résume les cas de figure des sept Etats les plus producteurs d'électricité photovoltaïque des Etats-Unis, dont la production totale représente 65% de la production nationale (Grout et Ifft 2018).

	Puissance installée	Nécessité de sortie du Agricultural Assessment si PV sur terrains agricoles ?	Pénalité à la conversion des terrains agricoles
Californie	33,7 TWh	Pénalité financière importante pour la mise en place de PV sur terrains agricoles en solaire, mais réduction de moitié sur les zones à faible qualité (zones agricoles « marginales »)	12,5% de la valeur marchande de la terre
Caroline du Nord	5,8 Twh	Pas de restrictions particulières. Possibilité de continuer à bénéficier des aides agricoles si continuité des activités agricoles	Montant de la différence entre les deux régimes d'impositions. Rétroactif sur 3 ans
New Jersey	2,8 TWh	Energy Plan de 2011 a identifié la préservation des terres comme l'un des objectifs premiers. Présence d'un zonage , avec pénalités importantes pour les zones à protéger et à l'inverse, incitations financières importantes de la mise en place de PV sur les terres dédiées	Montant de la différence entre les deux régimes d'impositions. Rétroactif sur 3 ans
Massachussets	2,6 TWh	Présence d'un zonage, avec demande d'autorisations supplémentaires pour la conversion de terres agricoles productives, incitations pour le développement du PV dans les zones dédiées	Montant de la différence entre les deux régimes d'impositions. Rétroactif sur 5 ans
Georgie	2,4 TWh	Pas de restrictions particulières	Pénalité qui diminue avec le temps
Minnesota	0,8 TWh	Le Minnesota n'identifie pas les terres agricoles comme un type de terrain à éviter pour le développement solaire.	Montant de la différence entre les deux régimes d'impositions. Rétroactif sur 3 ans

	Puissance installée	Nécessité de sortie du Agricultural Assessment si PV sur terrains agricoles ?	Pénalité à la conversion des terrains agricoles
Connecticut	0,5 TWh	Nouvelle loi sur l'implantation solaire définit un zonage pour l'implantation de grands projets solaires, avec des zones interdites	Pénalité qui diminue avec le temps

Tableau 21 : Résumé des dispositions de servitudes de conservation selon les états américains

5.3.2. Situation actuelle des installations photovoltaïques sur terrains agricoles

5.3.2.1. Définition de l'agrivoltaïsme

Il n'existe pas de définition claire de l'agrivoltaïsme, comme il n'existe pas d'objectifs chiffrés en ce qui concerne la capacité installée sur terrains agricoles.

Le fait qu'il existe certaines mesures d'aides financières spécifiques au photovoltaïque sur terrains agricoles, pour lesquelles être exploitant agricole est une condition d'éligibilité est une forme indirecte de définition. Toutefois, cette condition ne garantit pas que la production d'électricité se fasse sur les mêmes surfaces que la production agricole.

Des critères plus explicites concernant les ratios de surface ou les modèles d'affaire sont présents dans certaines réglementations étatiques :

- Dans les contrats relatifs à certaines servitudes de conservation de certains Etats, par exemple
 - o Au New-Jersey, la sortie de l'Agricultural Assessment n'est pas nécessaire dans le cas d'installations solaires ne dépassant pas 2MW, si elle n'utilise pas plus de 4 ha, qu'au moins 2 ha de terre restent en usage agricole, et si le rapport total des terres utilisées à des fins énergétiques par rapport aux terres utilisées en agriculture ne dépasse pas 1/5 (Grout et Ifft 2018).
 - o Dans le Vermont, une servitude nommée « current-utilisation tax » autorise la mise en place d'installations solaires sur les terres agricoles, à conditions qu'elles appartiennent aux agriculteurs et qu'au moins la moitié de l'électricité produite soit autoconsommée (Vermont Agency of Agriculture, Food and Market 2017)

Finalement, la réglementation du Massachusetts sur ses critères d'obtention d'une bonification du prix de rachat de l'électricité est la seule à faire intervenir la nécessité du maintien d'une double production.

5.3.2.2. Types et nombre d'installations déployées

Comme il n'existe pas de restrictions réglementaires, tous les types de projets existent aux Etats-Unis : serres photovoltaïques, centrales au sol et ombrières.

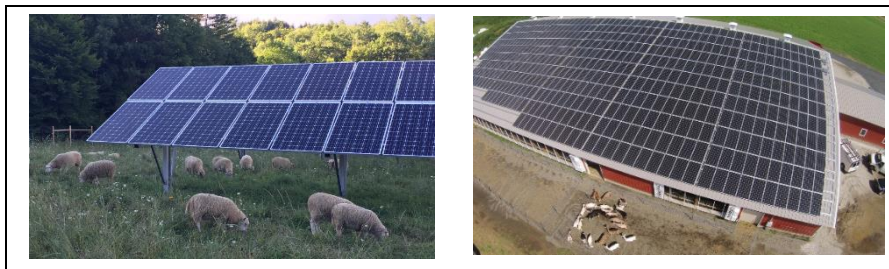


Figure 44 : Centrale au sol et modules photovoltaïques sur bâtiments dans le Vermont



Figure 45 : Ombrières sur maraîchage au Massachussets (National Renewable Energy Lab 2018) et centrales au sol entre des rangées de vignes en Californie (Chester 2017)

Malgré les pénalités financières, la sortie de servitudes de conservation pour la mise en place de projets photovoltaïques a représenté des surfaces importantes dans certains états. En Californie, 10 927 ha ont ainsi été convertis, contre 3642 en Caroline du Nord (puissance cumulée de 1GW) (Grout et Ifft 2018).

En ce qui concerne le solaire à la ferme, les données accessibles sont celles du REAP. En 2009, presque 8000 fermes avaient installé un projet d'énergie solaire sur leurs fermes (dont 7236 en solaire électrique et 1835 en thermal) (United States Department of Agriculture (USDA) 2009). Les projets avaient des capacités allant de 0.4 à 15 MW, avec une moyenne à 4.4 MW. Le solaire en agriculture s'est d'abord développé dans l'Ouest des Etats-Unis, et en particulier en Californie, où 1825 fermes avaient des modules solaires en 2009, ce qui représentait une capacité installée totale de 20,5 MWW. Cet état était bien loin devant le New Jersey (138 fermes, 1,9 MW) et l'Oregon (294 fermes, 0,882 MW) (Ministry of Agriculture, Food and Forestry 2009). En 2009, l'agriculture ne représentait qu'une petite portion de la puissance cumulée solaire aux Etats-Unis : seulement 4%.

Le nombre de fermes possédant des modules solaires a largement augmenté par la suite pour atteindre 36 331 en 2012 et 90 142 en 2017 (Perdue et Hammer 2017). Cette donnée provient du dernier recensement agricole en date, qui ne fait pas état des lieux des puissances installées.

5.3.2.3. Modèles d'affaires

Un premier modèle d'affaires est celui d'agriculteurs qui investissent directement dans leurs propres installations solaires, en bénéficiant éventuellement de subventions à l'investissement.

Il existe également des baux solaires, qui consistent à la location de terres à des développeurs photovoltaïques. Ces locations ont lieu pour des durées de 30-35 ans. Le plus souvent, la rémunération touchée par les agriculteurs est constituée d'une part fixe, qui dépend de la localisation des terrains, et d'une part variable, en général entre 3.5 et 4.5% du revenu brut généré par la vente de l'électricité (National Agricultural Law Center s. d.).

Il est à noter que certains baux solaires interdisent explicitement aux agriculteurs de continuer leur production, allant même jusqu'à clôturer les zones ainsi cédées. La distinction entre l'installation de photovoltaïque sur terrains agricoles et l'agrivoltaïsme prend ici tout son sens.

5.4. Allemagne

5.4.1. Dispositions réglementaires du photovoltaïque sur terrain agricoles

5.4.1.1. Mesures générales de soutien du photovoltaïque, accessibles au photovoltaïque sur terres agricoles

La politique allemande en matière de photovoltaïque est instaurée par l'Agence Fédérale de l'Environnement (Umweltbundesamt), à travers la publication des lois relatives aux énergies renouvelables, ou Erneuerbare Energien Gesetz (EEG). Ces lois définissent les types de soutien à l'électricité photovoltaïque, leurs montants ainsi que les conditions d'éligibilité.

En Allemagne, le soutien à la filière photovoltaïque se fait principalement par les FIT et les net metering, en place depuis l'EEG de 2000 (Journal Officiel 2000). Les prix d'achat d'électricité sont attribués de manière directe ou par des appels d'offres, selon les puissances des installations (Redaktionsassistentz 1 2013). Tous types d'installations confondues, le prix moyen de l'électricité se situait à 6.58 cts/kWh en 2017 (Bader 2017).

5.4.1.1.1. *Le photovoltaïque sur bâtiments*

De plus, l'EEG de 2012 (Ministère de l'Economie et de l'Energie 2012) fait mention d'une réglementation concernant les modules photovoltaïques sur bâtiments. Il est mentionné que «les modules photovoltaïques situés dans, sur ou au-dessus d'un bâtiment ou d'une installation structurelle qui avait été érigée à des fins autres que la production d'électricité à partir du rayonnement solaire» sont autorisés et éligibles aux mesures de soutien du photovoltaïque.

Les serres photovoltaïques, à priori, correspondent à cette définition lorsqu'elles ont été conçues en amont du projet d'installation photovoltaïque. La réglementation n'y fait toutefois pas mention de manière spécifique.

5.4.1.1.2. *Le photovoltaïque au sol*

Il existe une définition réglementaire pour l'éligibilité des modules photovoltaïques fixés au sol dans l'EEG de 2014 : toute installation de production d'électricité à partir de l'énergie du rayonnement solaire qui n'est pas installée, connectée ou sur un bâtiment ou une autre installation structurelle utilisée principalement à d'autres fins que la production d'électricité [...] solaire» (Ministère de l'Economie et de l'Energie 2014).

L'EEG ne précise pas s'il est interdit ou autorisé de mettre en place des modules photovoltaïques au sol sur terrains agricoles. En revanche, elle précise que les modules photovoltaïques au sol ne bénéficient des FIT que s'ils sont situés sur certaines zones. Il s'agit de zones défavorisées particulières : d'anciennes zones militaires ou décharges, et expansions de projets photovoltaïques existants le long d'autoroutes ou au bord de voies ferrées (Schindele et al. 2020). Bien que ces zones n'aient pas été classées comme étant des terrains agricoles, de l'élevage y était parfois associé.

5.4.1.1.3. *Une absence d'aides dédiées à l'agrivoltaïsme*

Le magazine allemand «PV-Magazine» précise que les installations agrivoltaïques ne sont pas mentionnées spécifiquement par les aides au financement de l'EEG. Ce point est confirmé par le site «agrophotovoltaik.de» qui explique que l'agrivoltaïsme n'est pas évoqué dans les deux types d'aide économique prévue par l'état pour les énergies renouvelables (ni tarif d'achat, ni via les appels d'offre) (agrophotovoltaik.de 2020).

De plus, les terres agricoles où sont mises en place des centrales photovoltaïques perdent leur éligibilité aux aides PAC, qu'il s'agisse de PV au sol (Schindele et al. 2020) ou sous serres (Ministère Fédéral de l'Alimentation et de l'Agriculture, 2015).

5.4.1.2. Mesures spécifiques de soutien au photovoltaïque sur terres agricoles

En 2015, une ordonnance (Ministère de l'Economie et de l'Energie 2015) met en place un système d'appel d'offres afin d'autoriser des installations photovoltaïques au sol à être mises en place sur des terres agricoles dans des zones défavorisées. L'appel d'offre est prévu pour la mise en place de 10 structures par an, pour des puissances nominales allant de 750 kW à 10 MW au maximum (soit 100 MW au maximum).

L'EEG de 2017 généralise cette procédure en octroyant une clause d'ouverture des Länder, qui accorde le droit aux Etats Fédéraux de décider de libérer des surfaces de culture et de prairies dans leurs zones défavorisées pour la construction de centrales solaires. Pour que les installations photovoltaïques soient éligibles à la tarification de l'EEG, il faut que le Länder publie une ordonnance légale autorisant l'extension aux zones défavorisées, en précisant ensuite le nombre maximal de projets à financer sur son territoire.

L'installation photovoltaïque répond ensuite à un appel d'offres lancé par l'Agence Fédérale des Réseaux.

Définition des zones défavorisées

La directive européenne 75/268/CEE (Conseil Européen 1975) à l'article 3 présente les principaux critères qui permettent de définir les terrains agricoles comme appartenant à des zones défavorisées. La directive européenne 86/465/EEC (Conseil Européen 1986) explicite les seuils réglementaires qui concernent l'Allemagne dans la définition de ses zones défavorisées et a ensuite été amendée en 1997 (Conseil Européen 997). Les critères retenus sont les suivants :

- Appartenance à une zone de montagne (altitude minimale de 600 mètres ou pente d'au moins 18 %)
- Zones soumises à des conditions climatiques difficiles
- Zone dépourvue d'équipements collectifs suffisant concernant l'accès aux exploitations, à l'électricité et l'eau potable
- Zones si peu densément peuplées que les cultures et l'intensification des productions ne peuvent se faire « sans coûts excessifs », donc principalement utilisables pour l'élevage extensif, où toutefois l'activité économique dépend fortement du maintien de l'activité agricole.

Les critères retenus sont : une densité inférieure à la médiane allemande, soit moins de 130 habitants par km² (en excluant la population des villes et des centres industriels dans un cas) avec une proportion en main d'œuvre agricole d'au moins 15% de la main d'œuvre totale (la moyenne nationale étant à 5.1%).

- Avec des résultats économiques inférieurs à la moyenne dans le secteur agricole (productivité annuelle inférieure à 70% de la moyenne nationale)

Actuellement, environ 50 % des terres agricoles en Allemagne sont désignées comme zones défavorisées (Ministère de l'Economie et de l'Energie 2020), et il en existe dans tous les Etats Fédéraux.

Jusqu'à présent, seules la Bavière et le Bade-Wurtemberg ont publié une ordonnance permettant d'autoriser la mise en place de centrale photovoltaïque au sol sur terrains agricoles, avec les contraintes suivantes :

- Baden-Württemberg : L'AO concerne des surfaces arables et des prairies. La taille maximale des installations est de 100 MW.
- Bavière : Fixation d'un seuil de 30 installations maximum par an, sur terres arables et prairies. Exclusion des zones Natura 2000 et des biotopes protégés.

Le nombre de projets étant limités, des critères stricts sont annoncés pour compter le nombre de projets : sont considérés comme une seule installation, des modules situés à moins de 4 km à vol d'oiseau, sur la même municipalité responsable du plan d'aménagement, et installés à moins de deux ans d'intervalle.

5.4.2. Situation actuelle des installations photovoltaïques sur terrains agricoles

5.4.2.1. Des définitions scientifiques de l'agrivoltaïsme

5.4.2.1.1. Le projet APV-Resola

En 2016, un programme de recherche portant spécifiquement sur l'agrivoltaïsme, APV-Resola a été lancé par plusieurs universités allemandes, dont l'Institut Fraunhofer.

Ces chercheurs définissent l'agrivoltaïsme comme des systèmes permettant simultanément une production primaire agricole et une production électrique secondaire, par une « utilisation optimale des synergies techniques et économiques entre ces deux productions » (Schindele et al. 2020).

Toutefois, ces synergies font encore l'objet de recherches : l'utilisation optimale des techniques n'a donc pas encore de définition claire.

5.4.2.1.2. Un guide de bonnes pratiques publié par le FRAUNHOFER

En Octobre 2020, un guide de bonnes pratiques a été publié par l'Institut Fraunhofer (Fraunhofer ISE, 2020). Ce document constitue un état de l'art de l'agrivoltaïsme en Allemagne : il recense les différentes installations existantes, les projets expérimentaux en cours et leurs enseignements, et fait le point sur la situation réglementaire actuelle.

Il ne propose pas en soi de définition de l'agrivoltaïsme, mais il donne des pistes pour promouvoir son développement et améliorer l'acceptabilité de ces projets en mobilisant les citoyens dans leur conception.

5.4.2.1.3. La publication d'une norme de définition de l'agrivoltaïsme

En 2021, la norme allemande DIN SPEC 91434 a été publiée. Elle a été développée en collaboration avec une quinzaine d'acteurs : agriculteurs, entreprises de production photovoltaïque, et universitaires, en particulier l'institut ISE Fraunhofer et l'Université de Hohenheim.

La définition proposée de l'agrivoltaïsme est la suivante : « L'utilisation combinée sur une même surface de terre d'une production agricole primaire et d'une production d'électricité photovoltaïque secondaire ».

La norme fixe plusieurs exigences pour attribuer la mention « agrivoltaïque » aux exploitations agricoles. Le document ne mentionne que les ombrières photovoltaïques et laisse de côté les serres photovoltaïques et les centrales au sol construites sur terrains agricoles, qui sont à priori exclues de cette définition.

Tout d'abord, la norme fait la distinction entre :

- les installations qui surélevées (hauteur supérieure à 2,10 m) (type I), où la production agricole est réalisée sous les panneaux,
- de celles qui sont proches du sol (type II), où les productions agricoles sont réalisées dans les rangées entre les panneaux.

Des distinctions sont également faites sur quatre types de productions agricoles : cultures permanentes et pérennes (type A), cultures annuelles et pluriannuelles (type B), prairies permanentes utilisées pour de la fauche (type C) et prairies permanentes pâturées (type D).

Pour être éligibles à la définition d'agrivoltaïsme, les installations doivent remplir les conditions suivantes :

- Un changement de production agricole est possible, mais il est interdit de passer d'une production de cultures annuelles, pluriannuelles ou pérennes à une prairie permanente, qu'elle soit fauchée ou pâturée.
- Un document de planification de l'utilisation de la parcelle après le projet est obligatoire. Il doit être co-rédigé par l'agriculteur et le développeur photovoltaïque, et intégrer des plans

d'utilisation des terres pour une durée de minimum 3 ans après la construction du projet (ou un cycle de cultures).

- En ce qui concerne les structures surélevées (avec cultures en dessous), les panneaux doivent être répartis uniformément sur la surface du projet. La distance entre les panneaux doit être conçue en fonction de l'orientation, pour permettre de maintenir la même production agricole qu'avant le projet.
- La perte de surface agricole utilisable (emprise au sol des piquets) doit être inférieure à 10% de la surface du projet pour les installations de type I et inférieures à 15% de la surface pour les projets de type II.
- L'exploitabilité de la surface identifiée comme exploitable (sous les panneaux ou entre les panneaux selon le type I ou II) doit être garantie.
- Une homogénéité de la lumière est recherchée autant que possible. L'intensité de la lumière ou de l'ombrage ainsi que les effets de bordure doivent être anticipés et adaptés au maximum aux besoins des cultures.
- La disponibilité de l'eau doit être adaptée aux conditions de croissance des cultures. Il faut notamment veiller à la distribution homogène de l'eau de pluie sous le système agrivoltaïque, grâce à un système d'irrigation ou par une évaluation au cas par cas des besoins en eau de la culture dans les conditions climatiques habituelles du site.
- Conception de la structure qui limite les risques d'érosion.
- Construction et démantèlement du système agrivoltaïque sans résidus.
- Le système doit être conçu pour garantir une rentabilité de l'exploitation agricole.
- Le rendement obtenu après la construction du système photovoltaïque doit correspondre à au moins 66% du rendement de référence. Celui-ci est défini comme la moyenne du rendement de la culture sur trois cycles de rotation des cultures (dans le cas où cette culture a déjà été réalisée sur l'exploitation), ou le rendement moyen des trois dernières années tirées de publications pertinentes (statistique agricole) dans le cas contraire. La vérification du respect de ce critère doit être réalisée par un organisme tiers.

5.4.2.2. Peu de projets identifiables à ce jour

Les modules photovoltaïques sur terrains agricoles ne représentent aujourd'hui qu'environ 0.1% de la surface agricole allemande (bizz-energy.com 2020). Ainsi, il existe peu de projets identifiables à ce jour.

L'un d'eux est celui de la ferme d'Heggelbach, l'un des projets de recherche de l'Institut Fraunhofer. Il s'agit d'une installation d'ombrières sur une surface de 2500 m², pour une puissance totale de 194 kW. Les cultures testées sont le blé, la pomme de terre, le céleri et le trèfle.

Un autre projet est en cours et devrait voir le jour fin 2020. Il s'agit d'une superficie de 12 ha accueillant une centrale photovoltaïque au sol d'une puissance de 4 MW, avec des modules montés à la verticale. La prairie située en dessous est pâturée et fait l'objet de coupes pour faire du foin et de l'ensilage.



Figure 46 : La centrale au sol du site de Donauessingen, proche de la forêt noire (à gauche); les ombrières de la ferme d'Heggelbach, lac Constance (à droite)

Si l'on regarde les chiffres concernant les appels d'offres nationaux pour les terrains agricoles en zones défavorisées : 32 projets au total ont autorisé en 2017, dont 19 en zones défavorisées (18 en Bavière et 1 dans le Baden-Württemberg). Les informations disponibles ne permettent pas de savoir s'il s'agit uniquement d'implantations de modules photovoltaïques sur des terrains agricoles, ou si cette installation est couplée à une production agricole.

Concernant les prix, la valeur d'attribution moyenne de l'appel d'offres en 2017 était de 5,66 cts/kWh (prix pondéré en fonction du volume). Le détail pour les projets situés en zones défavorisées n'est pas spécifié.

Toutes zones confondues, les centrales photovoltaïques au sol en Allemagne représentaient une puissance de 45.4 GW, dont 4.7 GW étaient installés sur 10 959 ha de terres arables (soit 0.07% des terres arables allemandes) (Schindele et al. 2020).

5.4.2.3. Modèles d'affaires

Comme l'EEG n'offre pas d'aide spécifique au financement de ces installations sur terres agricoles, les agriculteurs utilisent l'électricité produite en autoconsommation, ou doivent eux-mêmes vendre leur électricité sur le marché (bizz-energy.com 2020).

Différents types de modèles d'affaires peuvent exister :

- Autoconsommation de l'électricité produite pour l'exploitation de l'agriculteur (pv-magazine.de 2017) (Sonnenseite 2019).
- Autoconsommation, mais aussi injection dans le réseau électrique en coopération avec un partenaire. Par exemple, la ferme de Heggelbach, au Baden-Württemberg, passe par le partenaire EWS Schönauf pour injecter une partie de l'électricité sur le réseau (bioökonomie.de 2019)

Lorsque les projets agrivoltaïques ne sont pas éligibles aux tarifs de rachat permis par l'EEG, d'autres modes de financement existent :

- Des coopératives énergétiques ou « centrales électrique citoyennes » financent le projet (Agence de l'Energie 2019)
- Passer par des accords d'achat d'électricité (Power Purchase Agreements), c'est-à-dire des contrats d'approvisionnement direct avec des entreprises ou des fournisseurs d'électricité. C'est par exemple le cas en Bavière (stmwi.bayern.de 2020)

5.5. Italie

5.5.1. Dispositions réglementaires liées au photovoltaïque sur terrains agricoles

En Italie, les installations photovoltaïques sont soumises à la réglementation ICPE, conformément au décret législatif 387/2003 (Ministère du Développement Economique 2003). Des circulaires régionales définissent les modalités de ces procédures, en fonction de la puissance de ces installations, et de leur type (serres photovoltaïques par exemple).

5.5.1.1. Mesures générales de soutien du photovoltaïque, accessibles au photovoltaïque sur terres agricoles

En Italie, les mesures de soutien à l'énergie photovoltaïque sont détaillés dans les Conto Energia (CE), dont le premier a été publié en 2003 (Ministère du Développement Economique 2003). Les principaux instruments d'incitations qui s'y trouvent sont les FIT et les Net Metering.

La dernière modification de 2012 (décret ministériel 05/07/2012) a défini un plafond maximal pour le coût cumulé des FIT à 6,7 milliards d'euros. Ce plafond a été atteint le 6 Juillet 2013, ce qui a marqué un arrêt dans l'attribution d'aides pour l'installation et le fonctionnement de nouvelles structures photovoltaïques.

5.5.1.2. Mesures spécifiques de soutien au photovoltaïque sur terres agricoles

Avant 2013, il existait des restrictions quant à la mise en place de photovoltaïque sur terrains agricoles, qui conditionnait l'accès de ces installations aux aides du photovoltaïque.

Ces restrictions faisaient intervenir des critères relatifs aux rendements agricoles et au ratio de lumière arrivant sur les cultures et sur les modules photovoltaïques, que nous allons détailler ensuite. La présence de ces critères laissait donc penser à une définition implicite de l'agrivoltaïsme, bien que ce terme ne soit jamais employé dans la réglementation. Par ailleurs, la réglementation traitait les serres photovoltaïques de manière séparée des modules photovoltaïques posés au sol (centrales au sol et ombrières).

5.5.1.2.1. Des restrictions réglementaires pour les serres photovoltaïques : un cadre national, des modalités d'application régionales

Les serres photovoltaïques sont définies depuis l'arrêté ministériel du 19 février 2007 (Ministère du Développement Economique 2007) : il s'agit de « structures d'une hauteur minimale de 2 m, dont les modules photovoltaïques constituent les éléments de construction du toit ou des murs. Les serres doivent être dédiées aux cultures agricoles ou à la floriculture pendant tout le temps où elles reçoivent une incitation financière. La structure de la serre, en métal, en bois ou en maçonnerie doit être fixe, ancrée au sol ou éventuellement amovible pendant les saisons ».

Les serres photovoltaïques sont rendues éligibles aux mesures incitatives liées au photovoltaïque par l'arrêté du Ministère du Développement Economique du 6 Août 2010 (Ministère du Développement Economique 2010).

Le décret ministériel du 5 mai 2011 (Ministère du Développement Economique 2011a) a ajouté des contraintes supplémentaires à cette éligibilité, **en fixant une limite de 50% de taux de couverture des modules solaires sur les serres.**

Depuis 2013, aucune nouvelle installation photovoltaïque ne bénéficie de soutien financier de l'état italien. Les restrictions indiquées précédemment n'ont donc plus d'effet direct sur la mise en place des serres photovoltaïques.

Toutefois, l'autorisation de construire des serres est soumise à l'acceptation des autorités locales. Selon le cas, cela peut être la municipalité, la province ou la région. Certaines régions ont ainsi appliqué des contraintes réglementaires à la mise en place de ces serres, qui sont souvent plus importantes que l'ancienne réglementation nationale.

C'est le cas de la région de Pouilles qui fixe les modalités d'installations de serres photovoltaïques sur le territoire dans la circulaire n°1/2012 (Région de Pouilles 2012). Elle précise que les serres reçoivent un avis favorable si elles prouvent leur pertinence au regard des objectifs de développement agricole de la région (art 6 LR 19/86). Ainsi, le dossier doit contenir des informations sur les débouchés commerciaux, les impacts technico-économiques du projet et l'utilisation de la ressource en eau.

L'arrêté de la région des Pouilles impose également de vérifier que le potentiel de production dans la serre est supérieur à celui d'un champ ouvert. En cas de manque de données technico-économiques, il est admis que ce critère est respecté dans le cas où le taux de recouvrement des modules photovoltaïques est inférieur à 25%. Lorsque celui-ci est situé entre 25% et 50%, cela doit être justifié par des données agronomiques précises, liés à des ratios de niveaux d'éclairement entre l'intérieur et l'extérieur de la serre. Enfin, le dernier critère mentionné par la circulaire est que l'ombrage provoqué par les modules doit être uniformément réparti sur la zone de couverture.

5.5.1.2.2. Des conflits réglementaires en ce qui concerne les centrales photovoltaïques au sol sur terrains agricoles

En ce qui concerne les centrales photovoltaïques au sol, la réglementation a connu trois étapes :

De 2011 à 2012, une autorisation sous conditions, permettant l'accès de ces installations aux mesures de soutien photovoltaïque :

Le décret du 28 Mars 2011 (Journal officiel de l'Union européenne n° 71 du 28/03/2011 2011) prévoyait l'accès de tous les producteurs d'énergie renouvelables aux aides financières de l'Etat. **Les installations solaires de type centrale au sol dans les zones agricoles en faisaient donc partie, sous réserve du respect de certaines conditions : une puissance nominale des installations inférieure à 1MW, une distance d'au moins 2 km entre chacune des installations dans le cas où les terrains appartenaient au même propriétaire, un taux de recouvrement d'au maximum 10% des terrains détenus par un même propriétaire.**

Ces conditions n'étaient toutefois pas requises pour les terres abandonnées depuis au moins 5 ans. Le caractère « abandonné » des terrains agricoles se devait d'être défini par les Régions, comme le mentionne Conto Energia de 2011 (Ministère du Développement Economique 2011b). En effet, les régions doivent prévoir d'identifier les zones de leur territoire caractérisées par des "phénomènes étendus d'abandon" (Loi n. 440/1978 art.4), les recenser et mettre à jour chaque année une liste de ces surfaces, tout en informant les propriétaires concernés (Alessandro Fuda 2013).

En 2012, cette autorisation a été abrogée :

L'article 65 du décret du 4 Janvier 2012 (Journal Officiel de l'union européenne n°19-SO n°18 2012) interdit le recours aux incitations de l'État pour les systèmes installés sur les surfaces agricoles, sauf pour ceux dont les autorisations avaient été demandées et éventuellement acceptées entre temps, annulant ainsi la réglementation de l'année précédente.

En 2013, les soutiens au photovoltaïque ont été abandonnés.

Aujourd'hui, ce sont les réglementations régionales qui fixent le caractère autorisé ou non des centrales au sol. La plupart des régions l'interdisent, mais de fait, de nombreux projets sont installés.

Un exemple l'illustre bien : il s'agit de la controverse autour de la construction d'une centrale photovoltaïque de 48 MW de puissance sur 50 ha de terres agricoles en Vénétie, dans la municipalité de Canaro (Alessandro Fuda 2013). Ce projet entraînait en conflit avec la loi régionale de la Vénétie et le Plan réglementaire de la municipalité de Carano. La région de Vénétie a posé un veto à cette construction et un recours a été demandé auprès du conseil d'Etat par la société Enersol srl, à l'origine du projet. Le conseil d'Etat a finalement tranché en faveur de la construction de la centrale (l'arrêté 4755 du 26 septembre 2013, Tribunal Administratif de Vénétie 2013).

D'autres exemples existent, en Sardaigne notamment (Gruppo d'Intervento Giuridico onlus 2015) ou dans la province de Rome.

En effet, lorsque la réglementation locale interdit la mise en place de ces projets, il arrive que les porteurs de projets attaquent les administrations locales au tribunal administratif. Les exemples montrent que les tribunaux statuent en faveur de la mise en place des projets photovoltaïques. La raison invoquée est celle du respect des engagements pris par l'Italie en terme d'objectifs sur les énergies renouvelables auprès de l'Europe. Or, la hiérarchie du droit fait prévaloir ces obligations aux restrictions réglementaires locales.

5.5.2. Situation actuelle des installations photovoltaïques sur terrains agricoles

5.5.2.1. Types et nombres d'installations déployées

Les serres photovoltaïques



La puissance cumulée des serres photovoltaïques étaient estimées en 2015 à 5.8 GW en 2020 (EcoFocus 2016).

Figure 47 : Ferme de Scu Scioffu, ensemble de serres photovoltaïques d'une capacité totale de 20MW en Sardaigne (développeurs Mbccl et Twelve Energy) (Tagliaferri s. d.)

Les centrales au sol

Les données de capacité installée ne permettent pas de distinguer le photovoltaïque sur terrains agricoles des autres terrains. Actuellement, les régions italiennes où l'on trouve le plus de projets photovoltaïques au sol sont la Vénétie, la Toscane, les Marches, le Latium, l'Émilie-Romagne, les Pouilles et la Sicile (Leone 2019). Il n'existe pas non plus de données précises permettant de distinguer, parmi eux, les projets agrivoltaïques et ceux qui n'en sont pas.

Tous les types de systèmes existent en Italie : des ombrières sur grandes cultures (blés, prairies, colza, pois protéagineux) et des centrales au sol avec de l'élevage (Edera.digital s. d.) (Casarin 2012).



Figure 48 : Les ombrières sur blé khorasan et prairies dans la ferme de Virgilio, en Lombardie (2.15 MW, développeur REMTEC Energy) (Edera.digital s. d.) (à gauche) ; Centrale au sol avec de l'élevage à Ravenne (71 ha, 34.6 MW) (Più Notizie 2010) (à droite)

Dans le cadre de son plan de relance post – Covid 19, le gouvernement italien a annoncé vouloir investir 1,1 milliard d'euros dans le soutien à l'agrivoltaïque. Au total, le gouvernement italien prévoit de déployer 2 GW d'agrivoltaïque, qui devrait pouvoir générer environ 2500 GWh par an (Matalucci S., 2021).

5.5.2.2. Modèles d'affaires

Pour l'ensemble des installations photovoltaïques, plusieurs modèles d'affaires existent :

- Des systèmes où les propriétaires des terrains investissent eux-mêmes dans les installations ;
- Des systèmes de vente de terrain à des développeurs ;
- Des systèmes de concession à des développeurs. Il s'agit de la vente de « droits de superficie » : autrement dit, les développeurs payent un loyer au propriétaire du terrain pendant la durée de la concession. Celle-ci peut aller de 20 à 30 ans (Terreni Fotovoltaico s. d.). Dans ce cas, les développeurs supportent l'ensemble des coûts d'investissements et touchent l'intégralité du revenu lié à la vente de l'électricité.

Les développeurs sont particulièrement intéressés par les projets de grande taille, qui leur assure davantage de rentabilité. Ce modèle d'affaire se retrouve donc surtout sur des serres agricoles de grande surface (minimum 2500 m²) et sur des parcelles au sol d'au minimum 5ha d'un seul tenant.

5.6. Chine

5.6.1. Dispositions réglementaires liées au photovoltaïque sur terrains agricoles

5.6.1.1. Mesures générales de soutien du photovoltaïque, accessibles au photovoltaïque sur terres agricoles

La loi sur les Energies Renouvelables de 2005 a marqué la politique la plus importante de la Chine en matière de soutien au photovoltaïque (« China Passes Renewable Energy Law » 2005). Elle propose des Feed-in-Tarifs et des Renewable Portfolio standard, (« Renewable Energy Law of the People's Republic of China » s. d.), ainsi que des avantages fiscaux aux porteurs de projets photovoltaïques (Zhi et al. 2014).

En 2018, les FIT sont toujours en place mais commencent à diminuer. Leur valeur actuelle est indexée sur les tarifs de rachat de l'électricité produite par le charbon, majoré de 0,42 yuan/kWh (taxe comprise) (Fang et al. 2018).

5.6.1.2. Mesures spécifiques de soutien au photovoltaïque sur terres agricoles

5.6.1.2.1. Une interdiction sur les terres agricoles de meilleure qualité

Depuis 2008, le Parti Communiste Chinois a introduit la notion de « terres agricoles de base permanentes » (baike.baidu.com 2008). Il s'agit de terres qui doivent rester à vocation agricole, et leur conversion en autres types de terrains est strictement interdite.

Ces terres sont définies à partir des objectifs de production agricole fixés au niveau national. En 2020, ces surfaces représentaient 1,546 milliards de mu, soient 1,03 millions de km².

5.6.1.2.2. Une limite de puissance à 20 MW

Le 2 Septembre 2014, l'Agence Nationale de l'Energie a publié la loi sur la « Poursuite de la mise en œuvre des politiques connexes de production d'électricité distribuée » (n°406) (Agence Nationale de l'Energie 2014). Celle-ci précise que les projets photovoltaïques sur terrain agricole sont autorisés et éligibles aux tarifs de rachat (FIT) à condition qu'ils n'excèdent pas 20 MW.

Au-delà de cette limite, la mise en place de modules photovoltaïques sur terrains agricoles nécessitait la conversion des terres en zones « à urbaniser ». Si cette conversion était autorisée, ces projets étaient également éligibles aux FIT.

5.6.1.2.3. Des mesures supplémentaires laissées à la responsabilité des régions

Cette même année, l'Agence Nationale de l'Energie a publié un "avis d'émission sur le schéma de travail de la mise en œuvre des projets photovoltaïques de lutte contre la pauvreté". Ce communiqué mentionne que toutes les régions devraient formuler des politiques de subventions afin d'accroître le soutien aux zones rurales, en particulier pour l'électricité photovoltaïque dans le domaine agricole. Elle laisse la responsabilité aux régions de mettre en place des subventions adéquates pour faire coïncider les objectifs de développement économique des villages, l'agriculture et le développement des énergies renouvelables.

Ce communiqué vise particulièrement « les terres abandonnées, les collines et les pentes stériles, les hangars agricoles, les plages, les étangs à poisson, les lacs, etc » (National Energy Administration 2014), sans toutefois y apporter de restrictions réglementaires précises.

En 2017, le Conseil d'Etat a publié un règlement national sur les terres et les ressources. Celui-ci précise que les terrains classés en zones « agricoles » peuvent conserver ce statut lors de la pose d'installations photovoltaïques à condition que « la production agricole ne soit pas affectée » (chinalawedu.com 2017). Ici encore, la détermination de ces critères est laissée à la responsabilité des régions. Le gouvernement précise toutefois de prendre en compte des critères liés au rendement et au tassement du sol.

5.6.1.2.4. Un soutien régional largement répandu pour les serres photovoltaïques, plus rare pour le photovoltaïque au sol

Dans la grande majorité des régions, les serres photovoltaïques bénéficient d'aides régionales (Solar-in 2018).

Le photovoltaïque au sol bénéficie de subventions dans quelques provinces. Dans le Shandong, par exemple, ces installations bénéficient d'un bonus sur le prix de vente de 0,2 yuan/ kWh, en plus de certaines exonérations fiscales.

5.6.2. Situation actuelle des installations photovoltaïques sur terrains agricoles

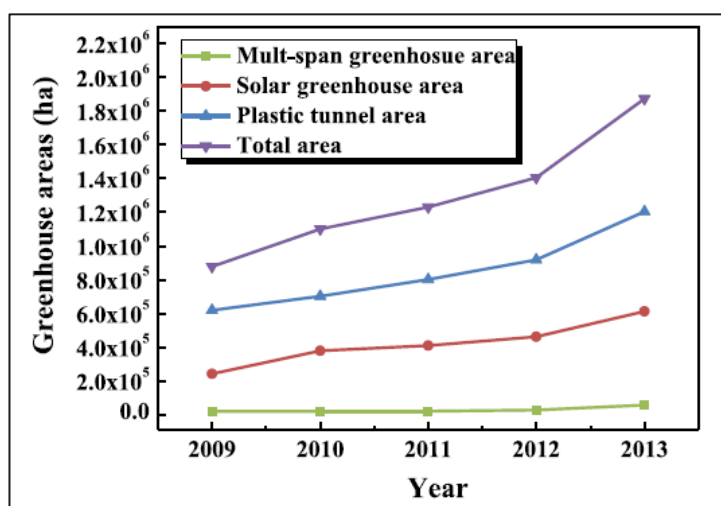
5.6.2.1. Type et nombre d'installations déployées

D'après une étude réalisée en 2020, la capacité totale des installations photovoltaïques sur des terrains réalisant une double production agricole et d'électricité a augmenté de 4 GW entre 2015 et 2018 en Chine (Schindele et al. 2020).

En effet, les serres photovoltaïques sont très fréquentes en Chine : en 2014, leur superficie atteignait 1 027 250 ha, soit un quart de la surface en bâtiments agricoles avec photovoltaïque dans le pays (Guangfu 2017), avec une puissance de 612 MW (Xue 2017). Leur capacité totale actuelle est de 2.9 GW (Schindele et al. 2020).

L'ensemble le plus important de serres solaires en Chine est située à Lu'an. Il s'agit d'un ensemble de 766 serres solaires, couvrant 167 ha. La puissance totale installée est de 50 MW (Wang et al. 2017).

Figure 49 : Evolution des surfaces de serres photovoltaïques jusqu'en 2013 (Wang et al. 2017)



Il existe également des centrales au sol, avec des élevages de moutons (notamment dans les districts de Zhangbei et Zhangjiakou), de poulets ou de canards (notamment en Mongolie intérieure), ainsi que des ombrières. Cette catégorie d'installations a, elle aussi, connu un fort développement avec 1700 MW installés entre 2015 et 2018 (Schindele et al. 2020).

5.6.2.2. Les modèles d'affaires

Différents modèles d'affaires existent en Chine, avec des agriculteurs propriétaires des installations photovoltaïques et des systèmes de location à des développeurs photovoltaïques, en général pour une durée de 20 ans (in-en.com 2016).

5.7. Vietnam

5.7.1. Dispositions réglementaires du photovoltaïque sur terrains agricoles

5.7.1.1. Mesures générales de soutien du photovoltaïque, accessibles au photovoltaïque sur terres agricoles

Le 12 septembre 2017, le ministère vietnamien de l'industrie et du commerce (MoIT) a publié la circulaire 16/2017/TT-BCT, nommée "Réglementation du développement des projets d'énergie solaire et accord normalisé d'achat d'électricité pour les projets d'énergie solaire".

Les modules PV au sol, sur toitures ou flottants bénéficient de Feed-in-Tariffs (FIT) à condition d'avoir souscrit des contrats de vente d'électricité pour 20 ans auprès d'Electricity Vietnam (EVN), la compagnie nationale de distribution d'électricité.

De plus, les PV sur toitures bénéficient également de net metering, avec des montants encourageant l'autoconsommation d'électricité (Brohm 2017).

Les montants des FIT ont été revus en 2019. Le tableau ci-dessous résume ces dispositions (Brohm et Nguyen 2018) (Burke, Dang, et NGuyen s.d) :

	Aides directes	Aides indirectes
Aides PV au sol	FIT d'un montant de 6.5 cts €/kWh Contrat achat électricité d'une durée minimale de 20 ans Emprise au sol ne dépasse pas 1,2 ha/MW de puissance	- Réduction de taxe sur le revenu : exemption les 4 premières années, taxes réduites de 50% de la 5 ^e à la 13 ^e année
PV sur toitures	Net metering, principalement pour l'autoconsommation. Rémunération de l'électricité solaire produite en excès au tarif de 8,6 cts €/kWh. Contrats de rachat d'électricité d'une durée de 20 ans	- Réduction de taxes sur le matériel importé - Réduction de taxes foncières
PV flottant	FIT introduits par la réglementation de 2019. Montant 7,1 cts €/kWh	

Tableau 22: Tableau récapitulatif des mesures de soutien au PV auquel le PV sur terrains agricoles est éligible (Burke, Dang, et NGuyen s.d)

5.7.1.2. Mesures spécifiques de soutien au photovoltaïque sur terres agricoles

5.7.1.2.1. Contraintes réglementaires sur terrains agricoles

Avant la mise en place de PV au sol et d'installations sur bâtiment d'une puissance > 1 MW sur des terrains agricoles, les investisseurs doivent réaliser des demandes officielles liées au projet. Ces demandes impliquent une « utilisation alternative des terres », qui doit être en accord avec les planifications nationales et locales du foncier agricole. Ces demandes doivent également contenir des évaluations de l'impact environnemental, et des consultations avec les parties prenantes locales (Programme des Nations Unies pour le Développement 2016).

Si ces demandes sont acceptées, les projets sont inscrits dans les plans provinciaux et nationaux relatifs au développement de l'énergie solaire et le plan de développement de l'électricité.

5.7.1.2.2. Eligibilité aux aides

La circulaire publiée en 2017 par le MoIT explique que pour être éligibles aux FIT, « la surface d'utilisation des terres à long terme d'un projet ne doit pas dépasser 1,2 ha/MW de puissance ». Cela exclut d'office les projets agrivoltaïques, dont l'emprise au sol se situe plutôt autour de 2-3 ha/MWp de puissance (Brohm et Nguyen 2018).

Ces dispositions ne sont pas précisées en ce qui concerne les serres PV, ni les panneaux PV flottants sur des bassins d'aquaculture (Ministry of Industry and Trade 2017).

De plus, il n'existe actuellement pas d'aides spécifiques à l'agrivoltaïsme au Vietnam (Brohm et Nguyen 2018).

5.7.2. Situation actuelle du PV sur terrains agricoles au Vietnam

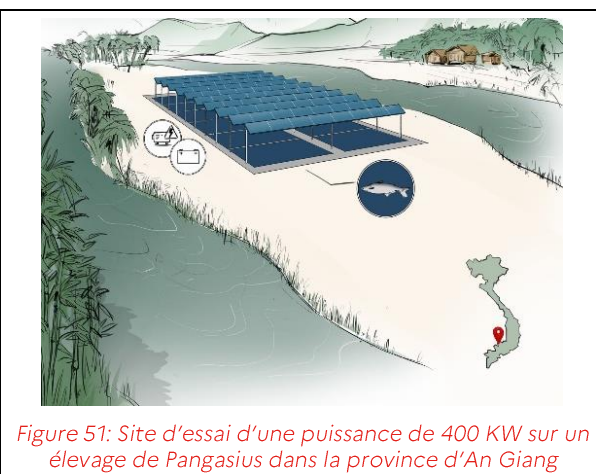
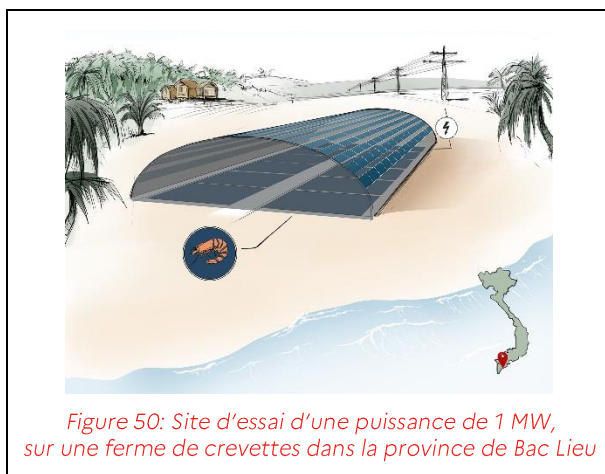
5.7.2.1. Définition du "dual-use" par le GreenID

Le Green Innovation and Development Centre (GreenID) est une organisation vietnamienne à but non lucratif (NPO) qui travaille à la promotion du développement durable au Vietnam et dans la région du Mékong.

Dans son rapport⁴⁶, elle propose une définition de l'agrivoltaïsme, appelé « dual-use », basé sur les études scientifiques internationales, et en particulier celles de l'Institut Fraunhofer en Allemagne. **La définition choisie est ainsi la suivante : « l'utilisation simultanée de la même superficie pour le photovoltaïque et la production agricole (aquaculture incluse) » (Brohm et Nguyen 2018).**

5.7.2.2. Types et nombres d'installations déployées

Actuellement, deux projets pilotes d'agrivoltaïsme ont été mis en place au Vietnam dans le cadre du programme allemand GIZ de soutien à l'énergie au Vietnam, et sont pilotés par l'institut de recherche Fraunhofer (Fraunhofer ISE 2019).



⁴⁶ Brohm, Rainer, et Quoc Khanh Nguyen. 2018. « Dual-Use Approaches for Solar Energy and Food Production: International Experience and Potentials for Vietnam ».

En juin 2018, les projets photovoltaïques installés représentaient une capacité totale de 40 000 MW. Le Vietnam s'est doté d'objectifs politiques ambitieux concernant le développement du photovoltaïque : en 2018, les projets en cours d'acceptation représentaient une puissance de 23 000 MW et une emprise au sol de 27 600 ha (Brohm et Nguyen 2018). La littérature ne fournit pas de chiffres concernant la part de ces surfaces en terrains agricoles. Toutefois, l'étude indique que 70% d'entre eux sont prévus dans les cinq provinces les plus au sud du Vietnam, et évoque de nombreux conflits d'utilisation des terres déjà en cours dans certaines zones rurales du pays.

En particulier, la province d'An Giang a accordé des aides supplémentaires pour les acteurs souhaitant investir dans l'énergie PV (Vietnam news 2018). Plusieurs projets PV ont alors été mis en place dont deux d'une puissance de 320 MW dans les provinces de Tị nh Biệ n et Chậ u Thà nh, installés sur d'anciennes rizières.



Figure 52: Installation solaire d'une puissance de 320 MW, installée sur d'anciennes rizières dans la commune de Tị nh Biệ n (Thahn 2020)

5.8. Autres projets pilotes dans d'autres pays

5.8.1. Inde

Le gouvernement de l'État indien du Gujarat a lancé une initiative visant les agriculteurs. Elle leur permet de produire de l'électricité pour de l'autoconsommation et de vendre le surplus au réseau. Cette mesure devrait bénéficier à environ 12 400 agriculteurs, pour une puissance installée de 175 MW (Brohm et Nguyen 2018).

Toutefois, hormis des projets pilotes, il n'y a pas de projets à grande échelle signalés en Inde. Il n'y a aucune mesure politique ciblée ni de cadre réglementaire en place (Brohm et Nguyen 2018).

5.8.2. Corée du Sud

La Corée du Sud a, elle aussi, mis en œuvre des projets pilotes concernant l'agrivoltaïsme, nommés « Smart-Farming Concepts » (Brohm et Nguyen 2018).

En 2016, un premier projet de recherche, mené par l'Institut Coréen de l'Energie Verte à Chungbuk Ochang, a été lancé, sur une puissance installée de 100 kW. Les effets sur le riz, le chou, le ginseng, le soja, l'ail et d'autres légumes ont été étudiés (Geon-oh 2018).

D'autres installations pilotes d'ombrières sur riz paddy ont été installées depuis : à Namdong (100 kW installés à Goseong, Gyeongnam), à Hansuwon (73 kW à Gapyeong, Gyeonggi-do) (Sang-bok 2017) et à Naju (20 kW, Jeollanam-do).



Figure 53: Expérimentation à Chungbuk Ochang (Geon-oh 2018)



Figure 54: Expérimentation à Goseong, Gyeongnam sur 6600 m² terres agricoles, puissance 100 kW, culture de riz paddy (Yonhap news 2017)

5.8.3. Croatie

En Croatie, un projet pilote a été construit en 2016 dans le village de Mecini, dans la région de Slavonie. Le système a une puissance installée de 500 kW, et produit environ 567 mWh par an. Des expérimentations sont réalisées sur différents légumes, sous le contrôle de la faculté d'agriculture de l'Université d'Osijek (Brohm et Nguyen 2018).

5.9. Synthèse des cadres réglementaires internationaux

Les tableaux suivants permettent de reprendre l'ensemble des informations recueillies sur les cadres réglementaires à l'international.

	JAPON	ETATS-UNIS	ALLEMAGNE	ITALIE	CHINE	VIETNAM
Réglementation liée au PV sur terrains agricoles	<p>Installation de PV nécessite conversion temporaire en terrains « non agricoles ».</p> <p>Conversion temporaire de 3 ans renouvelables ou de 10 ans sur zones défavorisées si :</p> <ol style="list-style-type: none"> Piliers d'une hauteur de plus de 2m Pas plus de 20% de perte de rendement 	<p>Contraintes sur les zones de conservation, spécifiques selon les Etats</p> <p>Au Massachussets, critères d'éligibilité aux aides spécifiques : Hauteur minimale (2.44m pour modules basculants, 3 m pour modules horizontaux), taux d'ombrage <50%</p>	<p>PV sur bâtiments (dont serres) autorisés si ceux-ci ont été érigés préalablement à des fins autres que la production d'énergie solaire.</p> <p>10 structures de PV au sol autorisées par an par appel d'offre : puissance maximale de 10 MW, sur zones défavorisées.</p>	<p>Serres photovoltaïques autorisées si hauteur minimale de 2m et taux de recouvrement des modules <50%.</p> <p>Circulaires régionales peuvent rajouter des contraintes (ex : sur le rendement en région de Pouilles)</p> <p>Contradictions réglementaires sur le PV au sol : autorisation nationale abrogée, parfois interdit au niveau régional mais mise en place sur le terrain par location de terrain aux développeurs</p>	<p>Conversion interdite sur les terres agricoles de base permanente.</p> <p>PV sur terrains agricoles autorisé si puissance < 20 MW. Depuis 2017, possibilité de garder statut foncier agricole peu importe la puissance si production agricole conjointe</p>	<p>Pour le PV au sol et le PV sur bâtiment d'une puissance > 1MW, nécessité d'accord avec planification locale et nationale</p>
Définition de l'agrivoltaïsme	<p>Nommé « solar sharing », défini comme « une installation PV sur des terres agricoles avec une continuité des activités agricoles »</p> <p>Critères : pas de détérioration de qualité, rendements >80% moyenne annuelle, hauteur des modules > 2 m</p>	Pas de définition	<p>Définition dans le cadre du programme de recherche APV-Resola : « un système qui accroît l'efficacité des terres en permettant simultanément une production primaire agricole et une production électrique secondaire, par l'utilisation optimale des synergies techniques et économiques entre ces deux productions »</p>	Pas de définition	Pas de définition	<p>Définition par GreenID, une organisation locale à but non lucratif.</p> <p>Appelé « dual-use » : utilisation sur même surface PV et production agricole</p>

	JAPON	ETATS-UNIS	ALLEMAGNE	ITALIE	CHINE	VIETNAM
Aides générales pour le PV non spécifique aux terrains agricoles	FIT, green certificates	Adoptés ou non selon les Etats Fédéraux : FIT, net metering, RPS, green certificates, processus d'amortissement accéléré, crédit d'impôt à l'investissement	FIT, Net metering	FIT, Net metering Pas de FIT accordé aux nouvelles installations depuis 2013	FIT, RPS	FIT, Net Metering pour le PV sur bâtiments
Aides financières spécifiques au PV sur terrains agricoles	Mises en place par les administrations locales. Projet de loi en cours pour la mise en place de subventions spécifiques à l'agrivoltaïsme	- Rural Energy for America Program (REAP), inclus dans les textes de politique agricole. Aides à l'investissement : Subventions (25% du montant total), garantie de prêts (50% du montant total) - Subventions aux produits à forte valeur ajoutée - FIT additionnel au Massachussets pour installations <2MW selon conditions	Pas d'aides financières spécifiques	Pas d'aides financières spécifiques	Subventions mises en place au niveau régional, pour les serres photovoltaïques comme le PV au sol.	PV au sol exclu des FIT: emprise doit être <1,2 ha/ MW Pas d'aides spécifiques
Conséquences des dispositifs PV sur terrains agricoles	Depuis 2013, 1905 permis de conversion temporaires ont été accordés, sur 482 ha Tous types de systèmes sauf centrales au sol (interdites)	90 142 exploitations avec PV en 2017, tous types de systèmes	Seuls la Bavière et le Bade-Wurtemberg proposent l'appel d'offres. En 2017, 18 projets autorisés sur zones défavorisées (dont 18 en Bavière) En incluant les anciennes zones de conversion, 4.7 MW de PV installé sur terres arables en 2018	Serres photovoltaïques nombreuses. Présence de projets de centrales au sol et d'ombrières	Serres photovoltaïques très développées : 2.9 MW sur 1.027 millions d'ha. Egalement des centrales au sol et ombrières : +1.7 GW entre 2015 et 2018	Mention faite PV installés sur des rizières et conflits d'usage dans régions sud 2 projets recherche agrivoltaïques dans le sud du Vietnam pilotés par Institut Fraunhofer

5.10. Enseignements préliminaires de l'étude des cadres réglementaires et juridiques étrangers du photovoltaïque sur terrains agricoles

La réglementation concernant le photovoltaïque sur terrains agricoles diffère grandement en fonction des pays.

En Allemagne et en Italie, les serres photovoltaïques et les centrales au sol sont traités de manière très différente dans la réglementation. En effet, l'emprise foncière due à l'installation de serres photovoltaïques est considérée comme bien moindre que pour les centrales au sol, et elles sont donc autorisées dans ces deux pays.

L'enjeu foncier lié aux centrales au sol est plus complexe à traiter, comme le démontre l'exemple italien où la réglementation nationale entre parfois en contradiction avec la réglementation régionale. Plusieurs options sont alors possibles :

- Interdire complètement les centrales photovoltaïques au sol (comme c'est le cas dans beaucoup de régions italiennes) ;
- Autoriser leur installation sous certaines conditions (comme le précisait l'arrêté italien du 28 mars 2011, ensuite abrogé, et les réglementations japonaises et chinoises et vietnamiennes) ;
- Autoriser leur installation dans des zones bien précises (comme en Allemagne, dans des zones défavorisées, ou en Chine, en dehors des « terres agricoles de base permanente »).

Deux approches sont également possibles dans l'obtention des permis de construire :

- le recours à une procédure d'autorisation ICPE ou similaire, comme en Italie ou au Vietnam, où le projet sera accepté s'il démontre une absence d'effet négatif sur le développement agricole local ;
- la réponse à un appel d'offres, comme en Allemagne, où le projet sera accepté s'il démontre son effet positif par rapport à la situation agricole et économique de la zone.

Aux Etats-Unis, il existe un zonage de terrains « protégés » en terres agricoles. Selon les Etats, installer des modules photovoltaïques sur ces terrains peut être interdit ou bien soumis à des restrictions (obligation d'être agriculteur, obligation d'autoconsommation de l'électricité produite, niveau de rendement agricole à maintenir...). Lorsque la pose des modules photovoltaïques sur ces zones de conservation est interdite, il est alors nécessaire de sortir de ce statut pour réaliser ces installations. Selon les Etats, ce changement de statut peut être fortement pénalisé financièrement, ne pas être contraint, voire être encouragé par des subventions, souvent sur un zonage prédéfini.

En Allemagne, en Italie, au Vietnam et aux Etats-Unis (hors Massachussets), le respect des contraintes citées ci-dessus conditionnent l'accès du photovoltaïque sur terrains agricoles aux autres mesures de soutien du photovoltaïque. Aux Etats-Unis, la politique agricole intègre un soutien financier à la mise en place de photovoltaïque, mais sans conditions concernant le couplage avec une production agricole. En revanche au Massachussets, en Chine et au Japon, des soutiens spécifiques à l'agrivoltaïsme existent.

Le Japon est le seul pays à proposer ce soutien à un niveau national, avec un cadre juridique donnant une définition de l'agrivoltaïsme. Nommé « solar sharing », il désigne « une installation photovoltaïque sur des terres agricoles avec une continuité des activités agricoles ». Il est ainsi le seul pays, étudié ici, à traiter des modules photovoltaïques sur les bâtiments agricoles et sur les terres agricoles dans les mêmes textes réglementaires.

Les autres pays qui aident spécifiquement le photovoltaïque sur terrains agricoles laissent la compétence aux régions ou aux états fédéraux dans la formulation d'une définition et dans le choix du mode et des niveaux de soutien.

Il est à noter que l'Allemagne a récemment proposé une définition de l'agrivoltaïsme dans une norme (DIN SPEC) qui concerne les cultures sous ou entre ombrières fixes. Cette norme donne des obligations réglementaires liées à la construction et au démantèlement des panneaux, à l'anticipation des modèles d'affaires et des modes de mise en culture, et imposent une baisse de rendement maximum de 30% par rapport à une référence locale.

Actuellement, le modèle allemand est le plus proche du modèle français, avec des projets montés au sein de PPA, et d'autres ayant recours à des prix de soutiens accordés par appels d'offres. Deux différences

résident cependant : en Allemagne, les appels d'offres sont accordés sur des zonages bien définis, à savoir les terres défavorisées (à condition que les Länder aient passé l'ordonnance permettant l'ouverture à ces terrains), et les serres photovoltaïques sont éligibles aux soutiens d'Etat.

L'obtention de ces aides rend les agriculteurs inéligibles aux aides de la PAC, ce qui constitue un facteur dissuasif important.

En synthèse, différents instruments réglementaires s'offrent à la France, selon les objectifs qu'elle souhaite poursuivre concernant le photovoltaïque sur terrain agricole. Il est possible de proposer des aides spécifiques, ou de conditionner l'accès aux aides existantes au respect de certains critères. Ces derniers peuvent être de différentes natures :

- Des critères agronomiques : taux de couverture par les modules photovoltaïques à l'échelle de la parcelle, ratio de luminosité entre les parcelles ou les serres et l'extérieur, rendement minimal à obtenir, éventuellement défini par rapport à un rendement de référence local ;
- Des critères liés à l'emprise au sol, comme au Vietnam où pour le PV au sol, l'accès aux FIT est conditionné au respect d'un seuil de surface par puissance installée. De fait, le seuil choisi pour l'instant au Vietnam exclut l'agrivoltaïsme ;
- Des critères liés aux objectifs de développement agricole selon les régions. Pour cela, le recours à un zonage spécifique peut être envisagé, avec des zones où la pose de modules photovoltaïques est possible, voire encouragée, et des zones où elle n'est pas encouragée (pas de possibilité d'avoir recours aux soutiens d'Etat), voire interdite (pas de possibilité d'installation, même en PPA) ;
- Des critères liés au modèle d'affaires : statut d'exploitant agricole, propriété des terrains, propriété des installations photovoltaïques, taux d'autoconsommation, taux de couverture par les modules photovoltaïques à l'échelle de l'exploitation agricole.

6. Conclusion

Il existe différents types de systèmes photovoltaïques sur terrains agricoles, que l'on peut classer en fonction des caractéristiques techniques des structures photovoltaïques (hauteur des structures, possibilité de piloter l'orientation des panneaux, caractère ouvert ou fermé pour les serres...) et des types de production qui y sont associées.

L'état de l'art scientifique met en évidence la complexité du sujet, au regard de plusieurs facteurs. Tout d'abord, l'impact des panneaux photovoltaïques sur les cultures varient selon les types d'installations en place (ombrières, serres, centrales au sol), les espèces cultivées et les conditions pédoclimatiques (ensoleillement, gestion de l'eau...). Par ailleurs, la quantité d'électricité produite par surface peut être affectée du fait de l'adaptation du système à la production agricole : panneaux moins denses, durée d'ensoleillement moindre dans le cas des ombrières mobiles. Enfin, d'un point de vue économique, le bilan est très variable selon les systèmes et les modèles d'affaires en place.

L'état de l'art réglementaire, quant à lui, montre qu'il n'y a que peu de pays qui ont établi une définition stricte de l'agrivoltaïsme. En effet, bien que ce type d'installations existe dans de nombreux pays, seuls le Japon et l'Allemagne ont à ce jour formulé des définitions du mot « agrivoltaïsme ». Néanmoins, de nombreux rapports sur le sujet ont été publiés pendant l'année 2020, signe d'un engouement important autour de ce nouveau marché.

Même en l'absence de ces définitions, il existe des cadrages réglementaires pour le photovoltaïque sur terrains agricoles, signe que la préservation de la vocation agricole des terrains est un sujet important. Les zonages des terrains, pouvant mener à interdire les installations photovoltaïques sur certains types de terres agricoles, se retrouvent en particulier dans les documents relatifs au foncier agricole, nécessitant une compétence nationale ou régionale pour en déterminer les contours.

En l'absence de cadre précis, la juridiction donne également des éléments sur la manière dont sont tranchés les contentieux sur la présence de ce type d'installations.

A travers cet ensemble d'éléments, cet état de l'art met en évidence le besoin d'approfondissement des connaissances sur le sujet des couplages « installation photovoltaïque – production agricole ». C'est l'objectif de cette étude, avec une partie d'enquête et de collecte de retours d'expérience pour permettre la rédaction d'une dizaine de fiches détaillées pour des systèmes identifiés (voir le livrable « Recueil des retours d'expérience et fiches techniques récapitulatives »).

A terme, cette étude doit également permettre de mieux caractériser tous types de systèmes photovoltaïques sur terrains agricoles et notamment, mieux définir l'agrivoltaïsme.

7. Références bibliographiques

7.1. Performance des systèmes photovoltaïques sur terrains agricoles

- Amaducci S., Yin X., Colauzzi M., 2018. Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production, *Applied energy* 220 545–561.
- Armstrong, A., Ostle, N.J., Whitaker, J., 2016. Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environ. Res. Lett.* 11, 074016.
- Barron-Gafford G. A., Pavao-Zuckerman M. A., Minor R. L., Sutter L. F., Barnett-Moreno I., Blackett D. T., Thompson M., Dimond K., Gerlak A. K., Nabhan G. P., 2019. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food– energy–water nexus in drylands, *Nature Sustainability*. 1–8.
- Bertin, N., Fatnassi, H., Vercambre, G., Poncet, C., 2015. Simulation of tomato production under photovoltaic greenhouses.
- Baxevanou, Catherine & Fidaros, Dimitris & Katsoulas, Nikolaos & Mekeridis, Evangelos & Varlamis, Chrisostomos & Zachariadis, Alexandros & Logothetidis, Stergios. (2020). Simulation of Radiation and Crop Activity in a Greenhouse Covered with Semitransparent Organic Photovoltaics. *Applied Sciences*. 10. 2550. 10.3390/app10072550.
- Bulgari, R., Cola, G., Ferrante, A., Franzoni, G., Mariani, L., Martinetti, L., 2015. Micrometeorological environment in traditional and photovoltaic greenhouses and effects on growth and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Italian Journal of Agrometeorology* 20.
- Cossu, Marco, Lelia Murgia, Luigi Ledda, Paola A. Deligios, Antonella Sirigu, Francesco Chessa, et Antonio Pazzona., 2014. Solar Radiation Distribution inside a Greenhouse with South-Oriented Photovoltaic Roofs and Effects on Crop Productivity ». *Applied Energy* 133: 89-100.
- Chuste Pierre-Antoine, Coutant Jérôme, 2020. Dynamic shading decreases the water consumption of peonies and increase quality and yield associated. 2.
- Dupraz C., Talbot G., Marrou H., Wery J., Roux S., Liagre F., 2011. To mix or not to mix: evidences for the unexpected high productivity of new complex agrivoltaic and agroforestry systems, in: *Proceedings of the 5th world congress of conservation agriculture: Resilient food systems for a changing world*.
- Dupraz, C., H. Marrou, G. Talbot, L. Dufour, A. Nogier, Ferard Y., 2011. Combining Solar Photovoltaic Panels and Food Crops for Optimising Land Use: Towards New Agrivoltaic Schemes. *Renewable Energy, Renewable Energy: Generation & Application*, 36, 10: 2725-32.
- Elamri, Y., Cheviron, B., Lopez, J.-M., Dejean, C., Belaud, G., 2018. Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces. *Agricultural Water Management* 208, 440–453.
- Elamri, Yassin, Cheviron, B., Mange, A., Dejean, C., Liron, F., Belaud, G., 2018. Rain concentration and sheltering effect of solar panels on cultivated plots. *Hydrology and Earth System Sciences* 22, 1285–1298.
- Emmott C. J. M., Röhr J.A., Campoy-Quiles M., Kirchartz T., Urbina A., Ekins-Daukes N., Nelon J., 2015, Organic Photovoltaic Greenhouses: A Unique Application for Semitransparent PV?, *Energy & Environmental Science*
- ENCIS Environnement, 2020. Analyse de la concurrence entre les parcs photovoltaïques au sol et les autres usages des sols, Focus sur les notions de l'agrivoltaïsme, 81.
- Enderlen, c., Guillemeau, s., Tiollier, I., 2020. Projet C Mécanisation de l'agrivoltaïsme "Comment adapter le machinisme agricole pour l'entretien des prairies et la récolte des fourrages en système agrivoltaïque ?" 28.
- Ezzaeri K., Fatnassi H., Bouharroud R., Gourdo L., Bazgaou A., Wifaya A., Demrati H., Bekkaoui A., Aharoune A., Poncet C., Bouirden L., 2018. Effect of photovoltaic panels providing shade in microclimate and tomato production under photovoltaic Canarian greenhouses. *Solar Energy*. 173, 1126-1134.
- Fatnassi, H., Poncet, C., Bazzano, M.M., Brun, R., Bertin, N., 2015. A numerical simulation of the photovoltaic greenhouse microclimate. *Solar Energy* 120, 575–584.
- Feistel, U., n.d. The impact of PV-FF parks on micro-climate, water balance and plant growth 30.

- Fortin, P., 2020. Les bénéfices de l'agrivoltaïsme, Sun'Agri.
- Fu J, Li C-H, Zhao J-R, Ma L, Liu T-X, 2009. Shade-tolerance indices of maize: selection and evaluation. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao*;20:2705e9.
- Gasparatosa A., N.H. Dollb C., Estebanc M., Ahmedc A., Olang. T., 2017. Renewable energy and biodiversity : implications for transitioning to a Green Economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*
- Goetzberger, A.; Zastrow, A, 1982. On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. *Int. J. Sol. Energy*, 1, 55–69.
- Goillon, C., 2016. Suivi climatique et agronomique dans une serre équipée de panneaux photovoltaïques 2016-fiche 16-061 11.
- Goillon, C., 2012. Suivi climatique et agronomique dans une serre équipée de panneaux photovoltaïques 2012 Fiche 12-075 9.
- Goillon, C., Camoin, L., 2017. Suivi climatique et agronomique dans une serre équipée de panneaux photovoltaïques FICHE-17_063 9.
- Goillon, C., Camoin, L., Feuvrier, E., Coste, A., de Crau, M., 2016. Suivi climatique et agronomique dans une serre équipée de panneaux photovoltaïques fiche 16-062 12.
- Goillon, C., Deboisvilliers, F., 2018. Suivis Agronomiques Sous Serres Photovoltaïques, poster.
- Goillon, C., Taussig, C., Lomagno, M., Gauthier, F., Terrentroy, A., Hallouin, I., 2013. Tomate cerise et melon Essai variétal sous serre photovoltaïque.
- Goillon et Deboisvilliers - 2018 - SUIVIS AGRONOMIQUES SOUS SERRES PHOTOVOLTAÏQUES.
- Grisey, Ariane, 2016. « Serres photovoltaïques en France, premiers retours sur les productions électrique et agricole ». *Infos CTIFL* janvier-février 2016, no 318.
- Harshavardhan D., Pearce J.M., 2016. The Potential of Agrivoltaic Systems ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54: 299-308.
- Hassanien Emam Hassanien, Reda, Li Ming, 2017. Influences of Greenhouse-Integrated Semi-Transparent Photovoltaics on Microclimate and Lettuce Growth. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 10, (6): 11-22.
- Hassanpour Adeh, E., Selker, J.S., Higgins, C.W., 2018. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLoS ONE* 13, e0203256.
- R.R. Hernandez, S.B. Easter, M.L. Murphy-Mariscal, F.T. Maestre, M. Tavassoli, E.B. Allen, C.W. Barrows, J. Belnap, R. Ochoa-Hueso, S. Ravi, M.F. Allen, Environmental impacts of utility-scale solar energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 29, 2014, Pages 766-779, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.041>.
- Ho, C. K. 2016. Review of avian mortality studies at concentrating solar power plants. *AIP Conference Proceedings*, 1734 (May 2016).
- Hsu D.D., O'Donoghue P., Fthenakis V., Heath G.A., Kim H.C., Sawyer P., Choi J-K, Damon E. Turney, 2012, Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Crystalline Silicon Photovoltaic Electricity Generation, *Journal of Industrial Ecology*;16(s1): S122–S135.
- I Care & Consult et Biotope, 2020, Photovoltaïque et biodiversité : exploitation et valorisation de données issues de parcs photovoltaïques en France. Rapport final.
- ISE 2019 - Agrophotovoltaics High Harvesting Yield in Hot Summer of 2018.
- Johnston, M., Onwueme, I.C., 1998. Effect of shade on photosynthetic pigments in the tropical root crops: yam, taro, tannia, cassava and sweet potato. *Experimental Agriculture* 34, 301–312.
- Kadowaki, M., Yano, A., Ishizu, F., Tanaka, T., Noda, S., 2012. Effects of greenhouse photovoltaic array shading on Welsh onion growth. *Biosyst. Eng.* 111 (3), 290–297.
- Kim H.C., Fthenakis V., Choi J-K, Turney D.E., 2012, Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Thin- film Photovoltaic Electricity Generation, *Journal of Industrial Ecology*,16, S110–21.
- Lin, S.; Zhang, Q.; Chen, Q. 2007. Shade-tolerance of ten species of garden plants. *J. Northeast For. Univ.*, 35,32–34.

- Majumdar, D.; Pasqualetti, M.J. 2017. Dual use of agricultural land: Introducing 'agrivoltaics' in Phoenix. *Landscape and Urban Planning*.
- Malu P. R., Sharma U. S., Pearce J. M. 2017 Agrivoltaic potential on grape farms in india, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 23 104– 110.
- Marrou, H., Dufour, L., Wery, J., 2013a. How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil–crop system? *European Journal of Agronomy* 50, 38–51.
- Marrou, H., Guilioni, L., Dufour, L., Dupraz, C., Wery, J., 2013b. Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural and Forest Meteorology* 177, 117–132.
- Marrou, H., Wery, J., Dufour, L., Dupraz, C., 2013c. Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *European Journal of Agronomy* 44, 54–66.
- Millstein D, Menon S. 2011. Regional climate consequences of large-scale cool roof and photovoltaic array deployment. *Environmental Research Letters* 6 (3): 034001.
- McNulty, J., 2017. Solar greenhouses generate electricity and grow crops at the same time, UC Santa Cruz study reveals. URL <https://news.ucsc.edu/2017/11/loik-greenhouse.html>
- Nagashima, 2014. A. Development and Prospect of Photovoltaic system "Solar Sharing". *J. Jpn. Sol. Energy Soc.*, 40, 11–15.
- Obergfell T., Schindele S., Bopp G., Goetzberger A., Reise C. 2013. Agrophotovoltaic – Agricultural production below optimized elevated photovoltaic
- Orée, 2017, Concilier énergies renouvelables et biodiversité
- OMBREA, SCP, IFV, Synthèse des résultats sur la vigne à Rians Millésime 2020. 6p.
- Perna A., Grubbs E. K., Agrawal R. and Bermel P., "Design Considerations for Agrophotovoltaic Systems: Maintaining PV Area with Increased Crop Yield," 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Chicago, IL, USA, 2019, pp. 0668-0672.
- Peschel R., Pesche T., Marchand M., Hauke J., 2019. Solarparks - Gewinne für die Biodiversität. *BNE Studies*.
- Poncet, C., Muller, M.M., Brun, R., Fatnassi, H., 2010. Photovoltaic greenhouses, nonsense or a real opportunity for the greenhouse systems? *Acta Horticult. Int. Soc. Horticult. Sci. (ISHS)*, 75–79
- Ravi, S., Macknick, J., Lobell, D., Field, C., Ganesan, K., Jain, R., Elchinger, M. and Stoltenberg, B., 2016. Colocation opportunities for large solar infrastructures and agriculture in drylands. *Applied Energy*, 165, pp.383-392.
- Rehan Younasa, Hassan Imrana, Muhammad Hussnain Riaz, Nauman Zafar Butta; 2019; Agrivoltaic Farm Design: Vertical Bifacial vs. Tilted Monofacial Photovoltaic Panels
- Réussir fruits & légumes | FLD, 2015. L'asperge peine sous les modules. Réussir fruits & légumes | FLD.
- Montag H., Parker G., Clarkson T., 2016. The Effects of Solar Farms on Local Biodiversity; A Comparative Study Biodiversity.
- Schindele S., Trommsdorff M., Schlaak A., Obergfell T., Bopp G., Reise C., Braun C., Weselek A., Bauerle A., Högy P., Goetzberger A., Webe E. 2020. Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Applied energy*, 265, 114737.
- Scognamiglio A., 2014. Photovoltaic Greenhouses: A Feasible Solution for Islands? Design, Operation Monitoring and Lessons Learned from a Real Case Study. In *Proceedings of the 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Kyoto, Japan, 23–27.
- Sekiyama T., Nagashima A., 2019. Solar Sharing for Both Food and Clean Energy Production: Performance of Agrivoltaic Systems for Corn, A Typical Shade-Intolerant Crop. *Environments* 6, 65.
- Senevirathna A., Stirling C.M., Rodrigo V.H.L., 2008. Acclimation of photosynthesis and growth of banana (*Musa sp.*) to natural shade in the humid tropics. *Experimental Agriculture*, 44:301e12.
- Solar Sharing Network. Solar Sharing for Fun. 2018. Available online: <https://solar-sharing.org/?p=6868>
- Trommsdorff M., Working Paper An economic analysis of agrophotovoltaics: Opportunities, risks and strategies towards a more efficient land use
- Trommsdorff. et al. 2020. Agrivoltaics: Opportunities for Agriculture and the Energy Transition. Fraunhofer Institute.

- Valle, B., T. Simonneau, F. Sourd, P. Pechier, P. Hamard, T. Frisson, M. Ryckewaert, Christophe A. 2017. Increasing the Total Productivity of a Land by Combining Mobile Photovoltaic Panels and Food Crops. *Applied Energy* 206: 1495-1507.
- Van der Horst. 2019. Solar Farms on Agricultural Land a Partial Equilibrium Analysis
- Varun, Bhat, I.K., Prakash R., 2009, LCA of renewable energy for electricity generation systems—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*;13 (5):1067–73.
- Weselek A., Ehmann A., Zikeli S., Lewandowski I., Schindele S., Högy P., 2019. Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. a review, *Agronomy for Sustainable Development* 39 (4) 35.
- Wu, Z.; Hou, A.; Chang, C.; Huang, X.; Shi, D.; Wang, Z. 2014. Environmental impacts of large-scale csp plants in northwestern China. *Environ. Sci. Process. Impacts*, 16, 2432–2441.
- Yano A., Kadowaki M., Furue A., Tamaki N., Tanaka T., Hiraki E., Kato Y., Ishizu F., and Noda S. 2010, "Shading and electrical features of a photovoltaic array mounted inside the roof of an east-west oriented greenhouse," *Biosyst. Eng.*, vol. 106, no. 4, pp. 367–377.
- Yano, A.; Onoe, M.; Nakata, J. 2014. Prototype semi-transparent photovoltaic modules for greenhouse roof applications. *Biosyst. Eng.*, 122, 62–73.

7.2. Cadres réglementaires et juridiques

7.2.1. France

- Arrêté tarifaire du 9 mai 2017 fixant les conditions pour bénéficier de l'obligation d'achat.
- Note d'instruction de la DGEC sur les modalités d'application de l'arrêté du 9 mai 2017.
- 2017, Appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'Installations de production d'électricité innovantes à partir de l'énergie solaire.
- 2017, Appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'Installations de production d'électricité à partir d'énergies renouvelables en autoconsommation et situées en métropole continentale
- 2016, Appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'Installations de production d'électricité à partir de l'énergie solaire « Centrales au sol ».
- 2016, Appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'Installations de production d'électricité à partir de l'énergie solaire « Centrales sur bâtiments, serres et hangars agricoles et ombrières de parking de puissance comprise entre 100 kWc et 8 MWc ».
- Délibération de la CRE du 11 janvier 2018 relative à la première période de l'AO solaire innovant, le rapport de synthèse version publique de la première période de candidature de l'AO solaire innovant.
- Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE), version Avril 2020.
- Circulaire du 18 décembre 2009 relative au développement et au contrôle des centrales photovoltaïques au sol.
- Loi n° 2014-1170 du 13 octobre 2014 d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt.
- Loi n° 2010-874 du 27 juillet 2010 de modernisation de l'agriculture et de la pêche.
- Décret n°2016-1190 du 31 août 2016 relatif à l'étude préalable et aux mesures de compensation prévues à l'article L. 112-1-3 du code rural et de la pêche maritime.
- Arrêt du 8 février 2017 (n° 395464) du Conseil d'Etat.
- Arrêt du 12 juillet 2019 (n° 422542) du Conseil d'Etat.
- Arrêt du 31 juillet 2019, (n°418739) du Conseil d'Etat.
- Cour administrative d'appel (CAA) Marseille, 3 avril 2015 (n°13MA02539).
- CAA Lyon, 21 mai 2019, (n°18LY01639),
- CAA Marseille, 25 juin 2019, (n°18MA00634),
- CAA Bordeaux, 18 février 2020, (n°18BX00809),
- CAA Bordeaux, 4 octobre 2012 n° 11BX01853,

CAA Bordeaux, 4 avril 2013, n°12BX00153,
 CAA Bordeaux, 15 mars 2018, n°16BX02223,16BX02224, 16BX02256,
 CAA Bordeaux,9 mai 2019, n°17BX01715,
 Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement des Pays de la Loire, 2010. Le développement de l'énergie solaire photovoltaïque
 Région Midi Pyrénées, Préfet Tarn et Garonne, 2011. Note de cadrage des services de l'Etat pour l'instruction des projets solaires photovoltaïques en Midi Pyrénées et en Tarn et Garonne
 Région Nouvelle-Aquitaine, 2020. Agri-solaire : projet pilote et industriel, appel à projets.

DDT de l'Indre-et-Loire, 2020. Document cadre pour le développement de l'énergie solaire photovoltaïque dans le département d'Indre-et-Loire
 DDT Haute-Garonne, 2019. Réaliser des projets photovoltaïques en dehors des zones urbanisées en Haute-Garonne
 DDT des Alpes de Haute Provence, 2018. Guide de recommandations à destination des porteurs de projet des parcs photovoltaïques au sol
 DDT du Gard, 2017. Guide à l'attention des porteurs de projets photovoltaïques au sol
 Chambre d'Agriculture de l'Yonne, 2019. Délibération professionnelle concernant le développement du photovoltaïque dans le département de l'Yonne
 CNPENAF du Loiret, 2019. Doctrine sur le développement des installations photovoltaïques au sol
 IFOP, 2020. Les français et le photovoltaïque, sondage pour Photosol.
 SolarPower Europe, 2021. Agrisolar Best Practices Guidelines Version 1.0.
 SolarPower Europe, 2021. Solar Sustainability Best Practices Benchmark.

7.2.2. Japon

Ministère de l'Agriculture, de la Forêt et de la Pêche. 2018a. « Conversion de terres agricoles pour l'installation d'infrastructures dédiées à la production d'énergie ». 15 mai 2018. https://www.maff.go.jp/j/press/shokusan/r_energy/180515.html.

———. 2018b. « D'excellents exemples de production d'énergie solaire sur terrains agricoles ». 30 mai 2018. https://www.maff.go.jp/j/press/shokusan/r_energy/attach/pdf/180515-1.pdf.

———. 2018. « Utilisation de la lumière du soleil sur les terres agricoles ». *Akita News 7* (novembre). <https://www.maff.go.jp/tohoku/tiiki/akita/attach/pdf/akitanews-7.pdf>.

YAMAZAKI, Mitsuhiro, et Osamu IKKI. 2018a. « National Survey Report of PV Power Applications in Japan ». https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/NSR_Japan_2018.pdf.

Ministère de l'Environnement. 2018. « The Basic Environment Plan ». https://www.env.go.jp/en/policy/plan/5th_basic/plan.pdf.

Ministry of Agriculture, Food and Forestry. 2018. « About farm-type solar power generation ». 2 janvier 2018. <https://www.maff.go.jp/j/shokusan/renewable/energy/attach/pdf/einou-29.pdf>.

OCDE. 2009. « Evaluation of Agricultural Policy Reforms in Japan ». <http://www.oecd.org/japan/42791674.pdf>.

Parti Démocratique. 2020. « Séance plénière de la chambre basse: Des amendements partiels à la législation fiscale locale sont débattus ». 13 février 2020. https://cdp-japan.jp/news/20200213_2593.

7.2.3. Etats-Unis

Boff, Daniel. 2015. « National Survey Report of PV Power Applications in the United States 2015 ». https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA_PVPS_National_Survey_Report_USA_2015.pdf.

- Chester, Matt. 2017. « Solar Power and Wineries: A Match Made in Heaven...and California ». *Chester Energy and Policy* (blog). 6 novembre 2017. <http://chesterenergyandpolicy.com/2017/11/06/solar-power-and-wineries-a-match-made-in-heaven-and-california/>.
- Grout, Travis, et Jennifer Ifft. 2018. « Approaches to Balancing Solar Expansion and Farmland Preservation: A Comparison across Selected States ».
- Ministry of Agriculture, Food and Forestry. 2009. « Farms Reporting Photovoltaic (PV) and Thermal Solar Panels by Type, Capacity, Installation Cost, Percent Funded by Outside Sources, and Year of Installation ». 2009. https://www.nass.usda.gov/Publications/AgCensus/2007/Online_Highlights/On-Farm_Energy_Production/energy09_1_03.pdf.
- National Agricultural Law Center. s. d. « Agricultural Leases Overview ». Consulté le 24 avril 2020. <https://nationalaglawcenter.org/overview/agleases/>.
- Perdue, Sonny, et Hubert Hammer. 2017. « 2017 Census of Agriculture ». https://www.nass.usda.gov/Publications/AgCensus/2017/Full_Report/Volume_1,_Chapter_1_US/usv1.pdf.
- Peterson, Collin C. 2008. « Text - H.R.2419 - 110th Congress (2007-2008): Food, Conservation, and Energy Act of 2008 ». Webpage. 2007/2008. 22 mai 2008. <https://www.congress.gov/bills/110th-congress/house-bill/2419/text>.
- Schindele, Stephan, Maximilian Trommsdorff, Albert Schlaak, Tabea Obergfell, Georg Bopp, Christian Reise, Christian Braun, et al. 2020. « Implementation of Agrophotovoltaics: Techno-Economic Analysis of the Price-Performance Ratio and Its Policy Implications ». *Applied Energy* 265 (mai): 114737. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114737>.
- United States Department of Agriculture (USDA). 2009. « 2007 Census of Agriculture: 2009 on Farm Energy Production ». https://www.nass.usda.gov/Publications/AgCensus/2007/Online_Highlights/Fact_Sheets/Practice_s/energy.pdf.
- . 2011. « Solar Energy Use in U.S Agriculture: Overview and Policy Issues ». https://www.usda.gov/oce/reports/energy/Web_SolarEnergy_combined.pdf.
- USDA. 2002. « Farm Security and Rural Investment Act of 2002 ». Section 9006, Energy Title. <https://www.congress.gov/107/plaws/publ171/PLAW-107publ171.pdf>.
- Perdue, Sonny, et Hubert Hammer. 2017. « 2017 Census of Agriculture ». https://www.nass.usda.gov/Publications/AgCensus/2017/Full_Report/Volume_1,_Chapter_1_US/usv1.pdf.
- Romich, Eric, et F John Hay. 2019. « Solar Electric Investment Analysis Series », 33.
- Vermont Agency of Agriculture, Food and Market. 2017. « Guide to Farming Friendly Solar ». https://energizeohio.osu.edu/sites/energizeohio/files/imce/Handout_solar_on_farms_report_2017.pdf.

7.2.4. Allemagne

- Agence de l'Energie. 2019. « Agrophotovoltaik: Neues Anlagendesign stellt Module senkrecht auf ». Blog ErneuerbareEnergien.NRW. <https://www.energieagentur.nrw/blogs/erneuerbare/beitraege/agrophotovoltaik-neues-anlagendesign-stellt-module-senkrecht-auf/>.
- Agrophotovoltaik.de. 2020. « Die Machbarkeit von Agrophotovoltaik Wird Demonstriert ». 2020. <http://sinnwerkstatt.com/apv>.
- Altenhöfer - Pflaum, Georg, et Renate Horbelt. 2017. « National Survey Report of PV Power Applications in Germany ».
- Bader, Klaus. 2017. « German Renewable Energy Act 2017 (EEG 2017) - What You Should Know | Global Law Firm | Norton Rose Fulbright ». <https://www.nortonrosefulbright.com/en/knowledge/publications/imported/2018/07/18/05>. 5. avril 2017. <https://www.nortonrosefulbright.com/en/knowledge/publications/85ea2d80/german-renewable-energy-act-2017-eeg-2017--what-you-should-know>.

- Bioökonomie.de. 2019. « Sellerie und Strom: Duales System auf dem Acker - Bioökonomie BW ». 2019. <https://www.biooekonomie-bw.de/fachbeitrag/aktuell/sellerie-und-strom-duales-system-auf-dem-acker>.
- Bizz-energy.com. 2020. « Agrophotovoltaik: Wenn Land doppelt genutzt wird ». 2020. https://bizz-energy.com/agrophotovoltaik_wenn_land_doppelt_genutzt_wird.
- Conseil Européen. 1997. « 97/172/EG : Décision de la Commission du 10 février 1997 modifiant la délimitation des zones défavorisées au sens de la directive 75/268/CEE en Allemagne ». 13 mars 1997. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A31997D0172>.
- . 1975. « Directive 75/268/CEE du Conseil, du 28 avril 1975, sur l'agriculture de montagne et de certaines zones défavorisées ». Text/html; charset=UTF-8. Journal officiel n° L 128 du 19/05/1975 p. 0001 - 0007; édition spéciale finnoise: chapitre 3 tome 6 p. 0074 ; édition spéciale grecque: chapitre 03 tome 12 p. 0095 ; édition spéciale suédoise: chapitre 3 tome 6 p. 0074 ; édition spéciale espagnole: chapitre 03 tome 8 p. 0153 ; édition spéciale portugaise: chapitre 03 tome 8 p. 0153 ; OPOCE. 28 avril 1975. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:31975L0268>.
- . 1986. Directive 86/465/CEE du Conseil du 14 juillet 1986 relative à la liste communautaire des zones agricoles défavorisées au sens de la directive 75/268/CEE (Allemagne). 273. Vol. OJ L. <http://data.europa.eu/eli/dir/1986/465/oj/deu>.
- Journal Officiel. 2000. « Loi pour la priorité des énergies renouvelables ». https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/sites/default/files/6-EEG00_031222.pdf.
- Fraunhofer ISE. 2018. « Agrophotovoltaik ». Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. 2018. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/leitthemen/integrierte-photovoltaik/agrophotovoltaik-apv.html>.
- Fraunhofer ISE, 2020. Agrivoltaics : Opportunities for agriculture and the energy transition, A guideline for Germany
- Ministère Fédéral de l'Alimentation et de l'Agriculture. 2015. « Mise en œuvre de la Politique Agricole Commune en Allemagne, réforme 2015 », 124 p.
- Ministère de l'Economie et de l'Energie. 2012. « Loi sur les sources d'énergie renouvelables du 25 octobre 2008 (Journal officiel fédéral I p. 2074), telle que modifiée par l'article 1er de la loi du 17 août 2012 (Journal officiel fédéral I p. 1754) ». Art 32 par 1. https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/sites/default/files/EEG2012_juris_120817.pdf.
- . 2014. « Loi sur les sources d'énergie renouvelable (EEG 2014) ». Art 5 par 16. https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/sites/default/files/EEG_2014_160829.pdf.
- . 2015. « Règlement relatif à l'introduction d'appels d'offres l'attribution de subventions pour les installations en plein air et modifiant d'autres règlements relatifs à la promotion des énergies renouvelables ». https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/V/verordnung-zur-einfuehrung-von-ausschreibungen-der-finanziellen-foerderung-fuer-freiflaechenanlagen.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
- . 2020. « Que sont exactement les "zones défavorisées" ? » [https://www.bmwi-energiewende.de/2020. https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2017/11/Meldung/direkt-erklaert.html](https://www.bmwi-energiewende.de/2020/https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2017/11/Meldung/direkt-erklaert.html).
- Pv-magazine.de. 2017. « Agro-Photovoltaik steigert die Landnutzungseffizienz um über 60 Prozent ». pv magazine Deutschland. 22 novembre 2017. <https://www.pv-magazine.de/2017/11/22/agro-photovoltaik-steigert-die-landnutzungseffizienz-um-ueber-60-prozent/>.
- Redaktionsassistentz 1, U. B. A. 2013. « Erneuerbare-Energien-Gesetz ». Text. Umweltbundesamt. Umweltbundesamt. 13 août 2013. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-gesetz>.
- Sonnenseite. 2019. « Zunehmend lukrativ: PV-Anlagen kombiniert mit Energiespeichern ». Sonnenseite. 2019. <https://www.sonnenseite.com/de/energie/zunehmend-lukrativ-pv-anlagen-kombiniert-mit-energiespeichern.html>.
- Stmwi.bayern.de. 2020. « Agrophotovoltaik - Wirtschaftsministerium Bayern ». Website des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie. 2020. <https://www.stmwi.bayern.de//beratung/agrophotovoltaik/>.

7.2.5. Italie

- Alessandro Fuda. 2013. « Photovoltaïque sur les terres agricoles: Un oui du Conseil d'Etat ». Fotovoltaiconorditalia. 17 octobre 2013. <https://www.fotovoltaiconorditalia.it/news/fotovoltaico-su-terreno-agricolo-si-dal-consiglio-di-stato>.
- Casarin, Daniel. 2012. « R.E.M. Racconta l' "Agrovoltaico": Quando l'Agricoltura Scopre Il Fotovoltaico ». Genitronsviluppo.Com. <http://www.genitronsviluppo.com/2012/07/30/rem-agrovoltaico/>.
- EcoFocus. 2016. « Serre Fotovoltaiche: agricoltura ed energia a braccetto ». *EcoFocus.it* (blog). 19 février 2016. <https://www.ecofocus.it/2016/02/serre-fotovoltaiche-produzione-agricola-ed-energetica-vanno-a-braccetto/>.
- Edera.digital. s.d. « REM Tec - La soluzione per il fotovoltaico legata all'agricoltura ». Consulté le 25 avril 2020. <https://www.remtec.energy/fr/agrovoltaico/installations/29-borgo-virgilio>.
- Gruppo d'Intervento Giuridico onlus. 2015. « In area agricola non si possono realizzare impianti fotovoltaici non a servizio di aziende agricole. » *Gruppo d'Intervento Giuridico onlus* (blog). 26 février 2015. <https://gruppodinterventogiuridicoweb.com/2015/02/26/in-area-agricola-non-si-possono-realizzare-impianti-fotovoltaici-non-a-servizio-di-aziende-agricole/>.
- Journal officiel de l'Union européenne n° 71 du 28/03/2011. 2011. « Mise en œuvre de la directive 2009/28/CE relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables et modifiant puis abrogeant les directives 2001/77/CE et 2003/30/CE ». https://www.minambiente.it/sites/default/files/dlgs_03_03_2011_28.pdf.
- Journal Officiel de l'union européenne n°19 -SO n°18. 2012. « Décret-loi n° 1 du 24 janvier 2012 - Dispositions urgentes pour la concurrence, le développement des infrastructures et la compétitivité ». *LeggiOggi* (blog). 24 janvier 2012. <https://www.leggioggi.it/allegati/decreto-legge-24-gennaio-2012-n-1-disposizioni-urgenti-per-la-concorrenza-lo-sviluppo-delle-infrastrutture-e-la-competitivita/>.
- Leone, di Leonardo. 2019. « Systèmes photovoltaïques au sol : voici comment gagner de l'argent en louant votre terrain ». *Casapassiva.net* (blog). 22 octobre 2019. <https://casapassiva.net/impianti-fotovoltaici-a-terra-ecco-come-guadagnare-affittando-il-tuo-terreno/>.
- Matalucci Sergio, 2021, Italy devotes €1,1 bn to agrivoltaics, €2 bn to energy community and storage, PV-magazine, [Italy devotes €1.1bn to agrivoltaics, €2bn to energy communities and storage – pv magazine International \(pv-magazine.com\)](https://www.pv-magazine.com/2021/05/italy-devotes-1-1-bn-to-agrivoltaics-2-bn-to-energy-community-and-storage/)
- Ministère du Développement Economique. 2003. « Mise en œuvre de la directive 2001/77/CE relative à la promotion de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables sur le marché intérieur de l'électricité ». 29 décembre 2003. http://www.bosettiegatti.eu/info/norme/statali/2003_0387.htm.
- . 2007. « Critères et méthodes visant à encourager la production d'électricité par la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire, en application de l'article 7 du décret législatif n° 387 du 29 décembre 2003 ». Annexe 3. https://www.conto-energia-online.it/decreto_conto_febbraio_2007.pdf.
- . 2010. « Encourager la production d'électricité photovoltaïque à partir d'énergie solaire ». Art 10, par 6. <https://energia.regione.emilia-romagna.it/leggi-atti-bandi-1/norme-e-atti-amministrativi/fonti-rinnovabili/nazionale/decreto%20ministeriale%206%20%20agosto%202010.pdf>.
- . 2011a. « Encourager la production d'électricité à partir de systèmes solaires photovoltaïques ». Art 14, par 2. http://www.enernew.it/allegati/DM_05_05_2011.pdf.
- Ministère du Développement Economique, Ministère de l'Environnement, et de la protection de la terre et la mer. 2011b. « Quarto Conto Energia ». 5 mai 2011. https://www.mise.gov.it/images/stories/normativa/DM_PV_firmato.pdf.
- Più Notizie. 2010. « La soluzione del fotovoltaico ». 2010. <http://www.piunotizie.it/news/pagina1010731.html>.
- Région de Pouilles. 2012. « Circulaire n° 1/2012: Critères et procédures d'autorisation pour la construction de serres photovoltaïques sur le territoire régional ». https://www.ediltecnico.it/wp-content/uploads/2012/05/circolare_serre_fotovoltaiche.pdf.

- Tagliaferri, Chiarina. s.d. « Su Scioffu, la serra fotovoltaica più grande del mondo è proprio in Italia ». Fotovoltaico Sul Web. Consulté le 24 avril 2020. <http://www.fotovoltaicosulweb.it/guida/la-serra-fotovoltaica-piu-grande-del-mondo-e-proprio-in-italia.html>.
- Terreni Fotovoltaico. s.d. « Louer un terrain pour le photovoltaïque : savez-vous comment faire ? » Commercial. Terreni Fotovoltaico. Consulté le 18 mars 2020. <https://terrenifotovoltaico.com/>.
- Tili, Francesca, et Giosué Maugeri. 2018. « National Survey Report of PV Power Applications in Italy ».
- Tribunal Administratif de Vénétie. 2013. « Jugement sur le recours introduit sous le numéro de registre général 744 de 2013 ». N. 04755/2013REG.PROV.COLL. N. 00744/2013 REG.RIC.

7.2.6. Chine

- Agence Nationale de l'Energie. 2014. « Avis de l'Administration nationale de l'énergie sur la poursuite de la mise en œuvre des politiques liées à la production d'électricité photovoltaïque distribuée ». 9 février 2014. http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201409/t20140904_1837.htm.
- Baike.baidu.com. 2008. « Terres agricoles de base permanente ». 2008. <https://baike.baidu.com/item/%E6%B0%B8%E4%B9%85%E5%9F%BA%E6%9C%AC%E5%86%9C%E7%94%B0/12981221?fromtitle=%E5%9F%BA%E6%9C%AC%E5%86%9C%E7%94%B0&fromid=672266>.
- Chinalawedu.com. 2017. « Opinions sur le soutien à la réduction de la pauvreté photovoltaïque et la réglementation de l'utilisation des terres dans la production d'électricité photovoltaïque ». 2017. <http://www.chinalawedu.com/falvfagui/22016/wa1710128206.shtml>.
- « China Passes Renewable Energy Law ». 2005. Renewable Energy World. 9 mars 2005. <https://www.renewableenergyworld.com/2005/03/09/china-passes-renewable-energy-law-23531/>.
- Fang, Lv, Xu Honghua, Wang Sicheng, Li Hailing, Ma Liyun, et Li Ping. 2018. « National Survey Report of PV Power Applications in China ». https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/NSR_China_2018.pdf.
- Guangfu. 2017. « L'agriculture photovoltaïque - une nouvelle façon de développer l'agriculture moderne ». 4 juillet 2017. <http://guangfu.bjx.com.cn/news/20170704/834785.shtml>.
- In-en.com. 2016. « Les terrains photovoltaïques doivent être attentifs au délai de location de la « loi contractuelle » ». 2016. <https://www.in-en.com/article/html/energy-2257812.shtml>.
- National Energy Administration. 2014. « Avis de l'Administration nationale de l'énergie sur la poursuite de la mise en œuvre des politiques liées à la production d'électricité photovoltaïque distribuée Guoneng Xinneng [2014] n° 406 ». 2 septembre 2014. http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201409/t20140904_1837.htm.
- « Renewable Energy Law of the People's Republic of China ». s.d. Consulté le 26 mars 2020. http://english.www.gov.cn/archive/laws_regulations/2014/08/23/content_281474983043598.htm.
- Solar-in. 2018. « Construire une serre agricole photovoltaïque: quelles sont les subventions ? » 8 janvier 2018. <http://solar.in-en.com/html/solar-2300275.shtml>.
- Xue, Jinlin. 2017. « Photovoltaic Agriculture - New Opportunity for Photovoltaic Applications in China ». Renewable and Sustainable Energy Reviews 73 (juin): 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.098>.

7.2.7. Vietnam

- Brohm, Rainer. 2017. « The New FIT/Net Metering in Vietnam – Ignition for Market Boost? » Rainer Brohm (blog). 2 octobre 2017. <http://rainer-brohm.de/new-fitnet-metering-regulation-solar-pv-vietnam-ignition-market-boost/>.
- Brohm, Rainer, et Quoc Khanh Nguyen. 2018. « Dual-Use Approaches for Solar Energy and Food Production: International Experience and Potentials for Vietnam ». http://rainer-brohm.de/wp-content/uploads/2019/02/Dual-use-approaches-for-solar-energy-and-food-production-international-experience_en.pdf.
- Burke, Frederick, Chi Lieu Dang, et Than Hai NGuyen. s.d. « Vietnam: Update of Key Changes to Draft Decision and Impact on Solar Power Projects ». s.d. <https://www.bakermckenzie.com/en/insight/publications/2019/11/impact-on-solar-power-projects-vietnam>.

- Fraunhofer ISE. 2019. «Aqua-PV: "SHRIMPS" Project Combines Aquaculture and Photovoltaics». Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. 2019. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/news/2019/aqua-pv-project-shrimps-combines-aquaculture-and-photovoltaics.html>.
- Ministry of Industry and Trade. 2017. «CIRCULAR Regulating Solar Power Project Development and Standardized Power Purchase Agreement for Solar Power Projects». http://rainer-brohm.de/wp-content/uploads/2017/10/2017_09_12_Circular-solar-PV-project_ENG.pdf.
- Programme des Nations Unies pour le Développement. 2016. «Politiques visant à développer l'énergie solaire au Vietnam». https://vietnam.un.org/sites/default/files/2019-07/Greening%20the%20power%20mix_VN.pdf.
- Thahn, Ahn. 2020. «Venez à Tinh Bien Pour Découvrir Le Domaine Des Batteries Solaires». Baodientu.Chinhphu.Vn. 2020. <http://baodientu.chinhphu.vn/Du-lich/Den-Tinh-Bien-de-trai-nghiem-can-h-dong-pin-dien-mat-troi/390096.vgp>.
- Vietnam news. 2018. «An Giang Offers Incentives to Investors in Renewable Energy Plants». Vietnamnews.Vn. 2018. <http://vietnamnews.vn/society/480128/an-giang-offers-incentives-to-investors-in-renewable-energy-plants.html>.

7.2.8. Autres pays

- Geon-oh, Lee. 2018. «Mettre l'accent sur l'énergie solaire de type agricole en promouvant un modèle de participation à la ferme». 인더스트리뉴스. 28 juin 2018. <http://www.industrynews.co.kr/news/articleView.html?idxno=24780>.
- Malu, Prannay R., Utkarsh S. Sharma, et Joshua M. Pearce. 2017. «Agrivoltaic Potential on Grape Farms in India». *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 23 (octobre): 104-10. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.08.004>.
- Sang-bok, Lee. 2017. «Hansuwon, Gapyeong Farmhouse Participation Photovoltaic Power Plant, First Harvest». :: :: 글로벌 녹색성장 미디어 - 이투뉴스. 3 novembre 2017. <http://www.e2news.com/news/articleView.html?idxno=103373>.
- Yonhap news. 2017. «Culture du riz et production d'électricité solaire». 연합뉴스. 15 juin 2017. <https://www.yna.co.kr/view/AKR20170615182900052>.

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Tableaux

Tableau 1: Types d'installation photovoltaïque généralement développés en France	14
Tableau 2: Types d'installation photovoltaïque développés dans le secteur agricole.....	16
Tableau 3: Types de couplages entre centrales photovoltaïques au sol et production agricole dans le monde	24
Tableau 4: Types de couplages entre ombrières photovoltaïques fixes et production agricole dans le monde	26
Tableau 5: Types de couplages entre ombrières photovoltaïques mobiles et production agricole dans le monde.....	28
Tableau 6: Types de couplages entre serres photovoltaïques et production agricole dans le monde ..	29
Tableau 7: Autres types de couplages photovoltaïques et production agricole dans le monde.....	30
Tableau 8: Liste des systèmes retenus pour faire l'objet d'une fiche détaillée	31
Tableau 9: Taux de saturation à la lumière de différentes espèces cultivées (Sekiyama and Nagashima, 2019)	45
Tableau 10 : Différence de diversité floristique et de productivité sous les modules, entre les modules et sur la zone témoin	47
Tableau 11: Accumulation relative de matière sèche (DM) et efficience de l'eau (WUE) exprimées en pourcentage du plein soleil pour des laitues et des concombres. DOY : Jour de l'année ; FD : pleine densité de modules ; HD semi densité	48
Tableau 12 : Biomasse fraîche et fraction de salade commercialisable pour 2 dates de récolte	49
Tableau 13 : Synthèse de l'impact sur la quantité et la qualité des productions agricoles de la présence de PV sur des terres agricoles.....	61

Tableau 14: LER pour 3 conditions d'ombrage contrastées et comparées à une situation témoin (Yassin Elamri et al., 2018)	63
Tableau 15 : Synthèse des soutiens financiers de l'Etat français pour le développement d'installations photovoltaïques et de l'éligibilité, selon le type de soutien, des terrains agricoles.	72
Tableau 16 : Jurisprudences autorisant les serres PV	80
Tableau 17 : Jurisprudences autorisant les centrales PV au sol	81
Tableau 18: Synthèse des systèmes : développement, cadre de rémunération de l'électricité PV et modalités de contractualisation	90
Tableau 19: Critères de définition de l'« agrisolaire » d'après le guide Solar Power Europe	97
Tableau 20 : développement des installations agrivoltaïques	101
Tableau 21 : Résumé des dispositions de servitudes de conservation selon les états américains	105
Tableau 22: Tableau récapitulatif des mesures de soutien au PV auquel le PV sur terrains agricoles est éligible (Burke, Dang, et NGuyen s.d)	117

Figures

Figure 1: Eléments constitutifs de cette étude.....	11
Figure 2 : Capacités PV installées et programmées en France dans le cadre de la PPE, source : SDES Tableau de bord : solaire photovoltaïque Quatrième trimestre 2019, Observatoire Energie Photovoltaïque 2019, PPE adoptée en avril 2020	12
Figure 3: Puissance photovoltaïque installée par région et par type de système Source : RTE 2020, Observatoire Energie Photovoltaïque 2020.....	13
Figure 4 : Diversité des systèmes photovoltaïques agricoles	22
Figure 5: Lien entre densité de production (kWh/m ²) et espacement. Source : Dinesh et Pearce 2016	34
Figure 6: Prototypes de panneaux photovoltaïques à microcellules solaires sphériques étudiés dans l'étude de Yano et al. 2014.....	35
Figure 7 : comparaison des poids à l'état frais et poids à sec sous une serre équipée de modules photovoltaïques semi-transparents vs. serre non-équipée de modules photovoltaïques, source : Hassanien et al. 2017.....	36
Figure 8 : LCOE actuel et prospectif des centrales PV au sol. Source : ADEME, Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France, 2020	37
Figure 9 : LCOE d'une centrale PV au sol standard vs. celui d'un système photovoltaïque agricole (APV). Source : Schindele et al. 2020	38
Figure 10 : Décomposition des CAPEX d'une centrale PV standard (PV-GM) vs. système photovoltaïque agricole (APV). Source : Schindele et al. 2020	38
Figure 11 : Décomposition des OPEX d'une centrale PV standard vs. système photovoltaïque agricole (APV). Source : Schindele et al. 2020	39
Figure 12 : Schéma des interactions entre production d'énergie PV et production agricole (CERESCO, 2020)	40
Figure 13: Répartition spatiale simulée de l'évapotranspiration sous différents dispositifs PV, pour une journée de solstice d'été (rayonnement maximal). (Y. Elamri et al. 2018).....	41
Figure 14: Effet de la hauteur des modules (1m vs 4m) sur l'hétérogénéité de la distribution de la lumière (Dupraz et al., 2011)	42
Figure 15: diversité des types de serres existants en France et étudiés par l'APREL dans la zone sud-est (source : APREL).....	42
Figure 16: rayonnement photosynthétique actif mesuré au cours de la journée du 23 juillet 2018 sous tunnel plastique et sous serre photovoltaïque. Capteurs placés en largeur de chapelle ou du tunnel sur un axe Est/Ouest. La ligne rouge correspond au PAR mesuré à l'extérieur (source : APREL)	43
Figure 17: Observations physiologiques et baisses de rendement observées par l'APREL pour les principales espèces concernées par les serres PV en zone provençale (Goillon and Deboisvilliers, 2018).....	43
Figure 18: Comparaison de rendements de tomates sous serre (PV vs traditionnelle) en Italie (Bertin et al., 2015)	44
Figure 19 : Synthèse des différents leviers mobilisés par la salade pour maximiser l'interception de la lumière (Marrou et al., 2013c)	45
Figure 20 : Synthèse des cultures les plus adaptées à l'ombrage des modules selon l'institut Fraunhofer (Trommsdorff, n.d.)	46
Figure 21: Photo d'une toiture de serre magenta, prototype réalisé par l'Université de Santa Cruz, en Californie (McNulty, 2017)	46

Figure 22 : Evapotranspiration potentielle calculée au-dessus de cultures de salades, concombres et d'un sol nu). (Marrou et al., 2013b) . DOY : Day Of Year = Jour de l'année ; FD : Full Density = pleine densité de modules ; HD : Half Density = semi densité.....	48
Figure 23: Impact potentiel de la présence de modules solaires sur le budget hydrique	50
Figure 24: Influence de la structure et agencement des modules (hauteur, longueur et espacement, testés en variation relative (en abscisses du graphe) sur l'hétérogénéité spatiale de la distribution de l'eau (coefficient de variation en ordonnées du graphe) (Yassi Elamri et al., 2018)	50
Figure 25: Simulation des schémas de répartition de l'eau dans le sol, dans trois zones et 2 configurations: panneau à plat (« flat panel » en haut de la figure) et par pilotage des modules (« avoidance strategy » au bas de la figure) pour réduire l'hétérogénéité de la pluviométrie (Yassin Elamri et al. 2018).....	51
Figure 26: Teneur en eau du profil de sol selon la zone, et à deux saisons : 6 mai 2015 (gauche) et 27 août 2015 (droite)	52
Figure 27: (de gauche à droite) exemples d'itinéraires culturels sur prairie avec centrale au sol, récolte de blé tendre d'hiver sur les parcelles expérimentales de l'institut Fraunhofer (Trommsdorff, n.d.), exemple de trajectoire de tracteur avec faucheuse attelée dans un parc (ENDERLEN, GUILLEMEAU, et TIOLLIER 2020).....	53
Figure 28: Exemple d'installations photovoltaïques adaptées pour accueillir des filets para-grêles.....	53
Figure 29 : Site expérimental de l'institut Fraunhofer en Allemagne. La taille de la structure suggère d'important effets de bords, comme sur la majorité des sites expérimentaux étudiés et recensés dans ce rapport.	62
Figure 30 : Effets des centrales solaires (ALLUSSE) incluant les installations à concentration solaire (USSECSP) et PV (USSEPV) pour la production et la distribution.....	65
Figure 31: Evolution des tarifs d'achats photovoltaïque en France jusqu'en 2016, source : photovoltaïque.info	68
Figure 32: Evolution du flux annuel d'installations raccordés au réseau en MW/an. La période d'emballement est illustrée à travers le volume record de raccordement de 2011. Source: Observatoire énergie photovoltaïque	69
Figure 33 : Evolution des prix moyen pondérés des dossiers retenus dans les appels d'offres CRE, source : analyse I Care d'après les résultats des appels d'offres CRE	70
Figure 34 : Principaux documents cadrant l'aménagement du territoire – Source CETIAC	73
Figure 35 : Informations contenues dans l'étude préalable agricole	77
Figure 36 : Schéma récapitulatif des modes de développement des installations photovoltaïques sur foncier agricole	78
Figure 37 : Points d'attention étudiés par les développeurs avant le dépôt d'une demande de permis de construire pour une installation photovoltaïque sur terrain agricole (CETIAC)	88
Figure 38 : Principe général du modèle d'affaire liés aux centrales au sol sur terrain agricole	89
Figure 39: Présentation des résultats du sondage sur l'adhésion à la pratique de l'agrivoltaïsme sur des terres agricoles au sein de sa commune	95
Figure 40: Présentation des résultats du sondage sur l'adhésion à la pratique de l'agrivoltaïsme si des études prouvaient l'efficacité et la pérennité de l'activité agricole ¹³	95
Figure 41: Classification des projets photovoltaïques sur terrains agricoles selon le document Solar Power Europe.....	96
Figure 42 : Exemples d'ombrières PV au Japon (de gauche à droite : cultures de riz paddy, soja, thé	101
Figure 43 : Exemple d'une serre photovoltaïque au Japon, sur cultures hydroponiques de moutarde, pamplemousse, roquette, laitue et basilic.....	101
Figure 44 : Centrale au sol et modules photovoltaïques sur bâtiments dans le Vermont	105
Figure 45 : Ombrières sur maraichage au Massachusetts (National Renewable Energy Lab 2018) et centrales au sol entre des rangées de vignes en Californie (Chester 2017)	106
Figure 46 : La centrale au sol du site de Donaueschingen, proche de la forêt noire (à gauche) ; les ombrières de la ferme d'Heggelbach, lac Constance (à droite).....	110
Figure 47 : Ferme de Scu Scioffu, ensemble de serres photovoltaïques d'une capacité totale de 20MW en Sardaigne (développeurs Mbccl et Twelve Energy) (Tagliaferri s. d.)	114
Figure 48 : Les ombrières sur blé khorasan et prairies dans la ferme de Virgilio, en Lombardie (2.15 MW, développeur REMTEC Energy) (Edera.digital s. d.) (à gauche) ; Centrale au sol avec de l'élevage à Ravenne (71 ha, 34.6 MW) (Più Notizie 2010) (à droite)	114
Figure 49 : Evolution des surfaces de serres photovoltaïques jusqu'en 2013 (Wang et al. 2017).....	116
Figure 50: Site d'essai d'une puissance de 1 MW,	118

Figure 51: Site d'essai d'une puissance de 400 KW sur un élevage de Pangasius dans la province d'An Giang.....	118
Figure 52: Installation solaire d'une puissance de 320 MW, installée sur d'anciennes rizières dans la commune de Tịnh Biên (Thahn 2020)	119
Figure 53: Expérimentation à Chungbuk Ochang (Geon-oh 2018)	120
Figure 54: Expérimentation à Goseong, Gyeongnam sur 6600 m ² terres agricoles, puissance 100 kW, culture de riz paddy (Yonhap news 2017)	120

SIGLES ET ACRONYMES

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AO CRE	Appels d'offres nationaux, opérés par la Commission de Régulation de l'Énergie
CAA	Cour Administrative d'Appel
CAPEX	Capital Expenditure
CC	Carte Communale
CDPENAF	Commission Départementale de la Préservation des Espaces Naturels, Agricoles et Forestiers
CRE	Commission de Régulation de l'énergie
CTIFL	Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes
DDT	Direction Départementale des territoires
DGEC	Direction Générale de l'Énergie et du Climat
DTA	Directives Territoriales d'Aménagement
EPA	Etude préalable agricole
ETP	Equivalent Temps Plein
FNO	Fédération Nationale Ovine
GW	Gigawatt
ha	Hectare
IDELE	Institut de l'Elevage
INAO	Institut National de l'Origine et de la Qualité
INRAE	Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement
kW	kilowatt
LCOE	Levelized Cost Of Energy
LER	Land Equivalent Ratio
Modules OPV	Modules photovoltaïques organiques
MTES	Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire
MW	Mégawatt
OPEX	Operational Expenditure
PCAET	Plan Climat-Air-Energie Territorial
PLU	Plan Local d'Urbanisme
PNR	Parc Naturel Régionaux
POS	Plan d'Occupation des Sols
PPA	Power Purchase Agreement
PPE	Programmation Pluriannuelle de l'Énergie
PV	Photovoltaïque
SCOT	Schéma de Cohérence Territoriale
SDAGE	Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SIQO	Signes Officiels de la Qualité et de l'Origine
SRADDET	Schémas Régionaux d'Aménagement de Développement Durable et d'Égalité des Territoires
SPE	Solar Power Europe
SYNALAF	Syndicat National des Labels Avicoles de France
ZAN	Zéro artificialisation nette

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique - nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, air, économie circulaire, alimentation, déchets, sols, etc., nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



CARACTERISER LES PROJETS PHOTOVOLTAÏQUES SUR TERRAINS AGRICOLES ET L'AGRIVOLTAÏSME

Cette étude vise à caractériser les projets photovoltaïques sur terrain agricole et à définir précisément la notion d'agrivoltaïsme.

Elle s'est basée sur un état de l'art bibliographique, des entretiens avec des agriculteurs et développeurs et l'expertise d'un comité d'experts, constitué spécifiquement pour suivre ces travaux.

Ce rapport est l'un des quatre documents produits dans le cadre de l'étude, avec un recueil de retours d'expérience, un guide de caractérisation du photovoltaïque sur terrains agricoles et un résumé exécutif. Il constitue la première étape de ces travaux.

Etat de l'art bibliographique

Cet état de l'art présente les différents enjeux du photovoltaïque sur terrains agricoles et dresse un panorama des différents systèmes photovoltaïques pouvant exister dans ce domaine : centrales au sol, ombrières fixes, ombrières mobiles, serres photovoltaïques...

L'étude bibliographique présentée dans ce document permet notamment de recenser les performances de ces couplages entre photovoltaïque et agriculture sur les aspects énergétique, économique, agricole et environnemental.

Enfin, le cadre de développement de ces systèmes est présenté pour la France, tenant compte des attentes de la filière photovoltaïque, mais également pour différents pays comme le Japon, les Etats-Unis, l'Allemagne, l'Italie, la Chine ou le Vietnam.

