

Agrivoltaïsme

Mieux utiliser la lumière du soleil
Enjeux, Potentiel, Controverses

17 Septembre 2024 Montpellier

**Session de formation sur l'agrivoltaïsme pour les adhérents de France Nature
Environnement**



Christian Dupraz
**INRAE, UMR Absys, Université de Montpellier,
France**



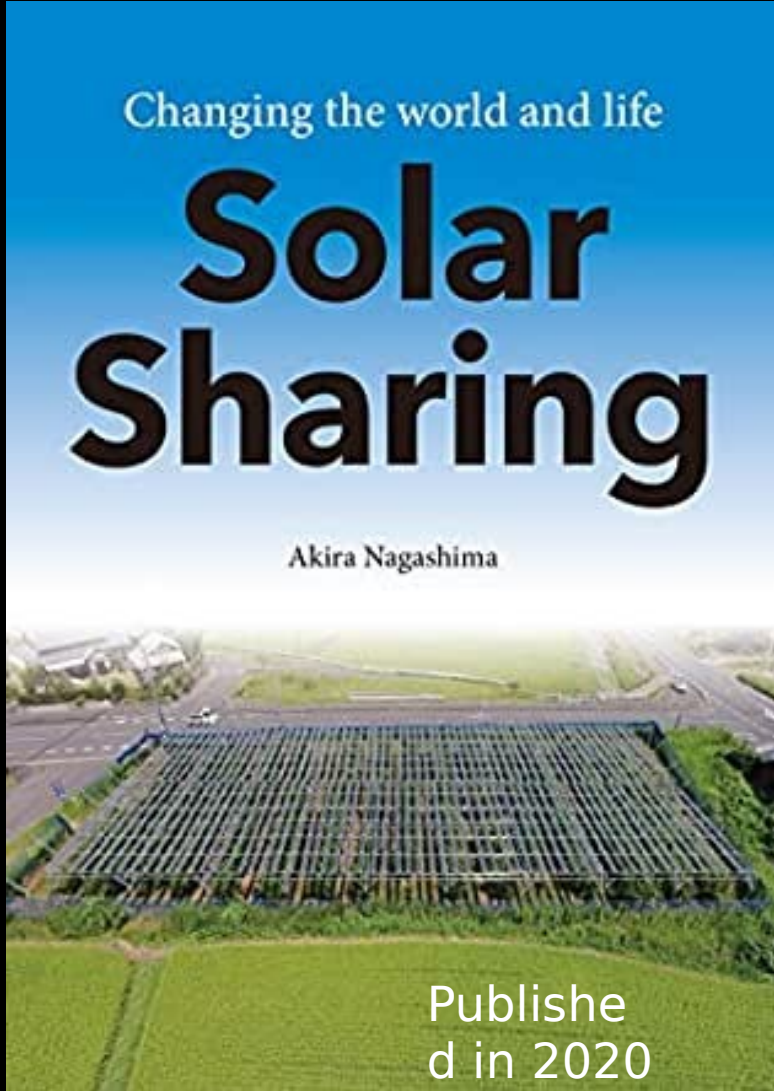








Japon







Italie



Revolution Energy Maker
(RemTec)

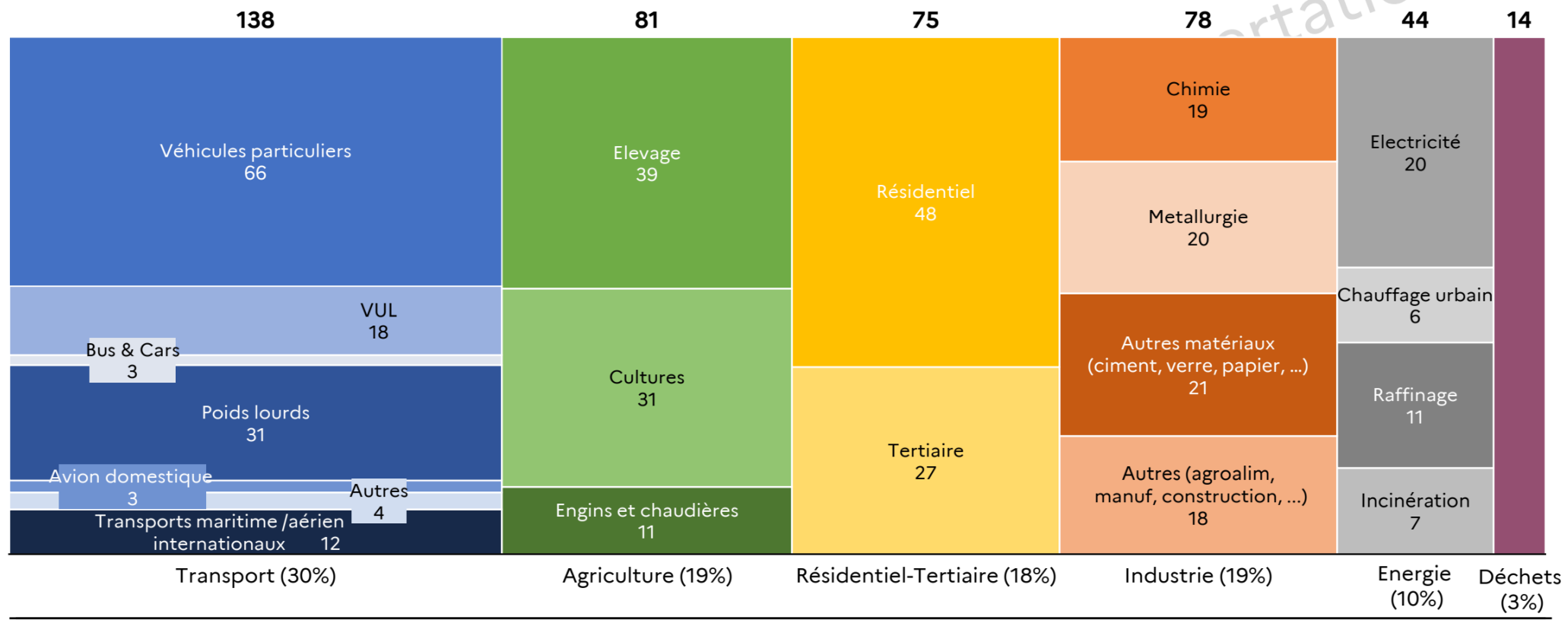


Produire de l'énergie à partir des terres agricoles ?

- Il faut augmenter la production alimentaire mondiale de 56% d'ici 2050
 - -> sanctuariser les terres agricoles?
 - -> Les retours de résidus de culture au sol sont indispensables au maintien de la fertilité
- Jusqu'à la découverte des énergies fossiles, la moitié de la surface agricole servait à produire de l'énergie pour les mobilités et le travail agricole



Emissions annuelles de gaz à effet de serre (GES) en France en 2021 (MtCO2e)



Energie pour les mobilités : agrocarburants et agrivoltaïsme

Avec 1 hectare

- colza - > diester -> Moteur thermique diesel -> 20 000 km
- blé - > éthanol -> moteur thermique à essence -> 22 000 km
- culture biomasse -> BTL -> Moteur thermique -> 60 000 km
- panneaux photovoltaïques -> electricité -> e-carburants de synthèse (PTL) -> Moteur thermique -> 450 000 km
- panneaux photovoltaïques -> electricité -> H₂ -> Pile à combustible -> Moteur électrique -> 900 000 km
- panneaux photovoltaïques -> electricité -> Moteur électrique -> 3 250 000 km

Production agricole alimentaire maintenue

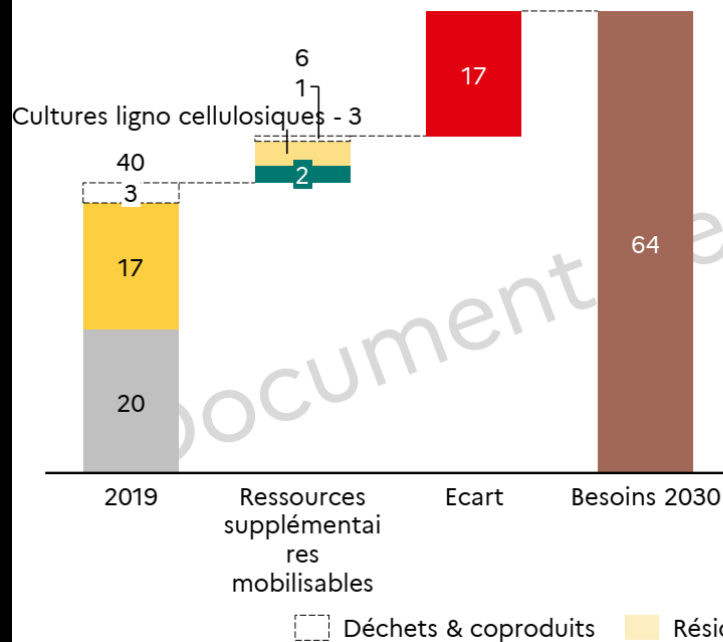
20 000 ha de photovoltaïque permettent autant de déplacement que 1 Million d'ha de cultures énergétiques

Bio-énergies : une situation tendue dès 2030

Biomasse liquide : forte hausse, alors que >50% de notre conso est importée

Pour le transport routier (37TWh en 2030), les soutes internationales (jusqu'à 10TWh), la bio-chimie (+8TWh), l'agriculture, Outre-Mer (4TWh)

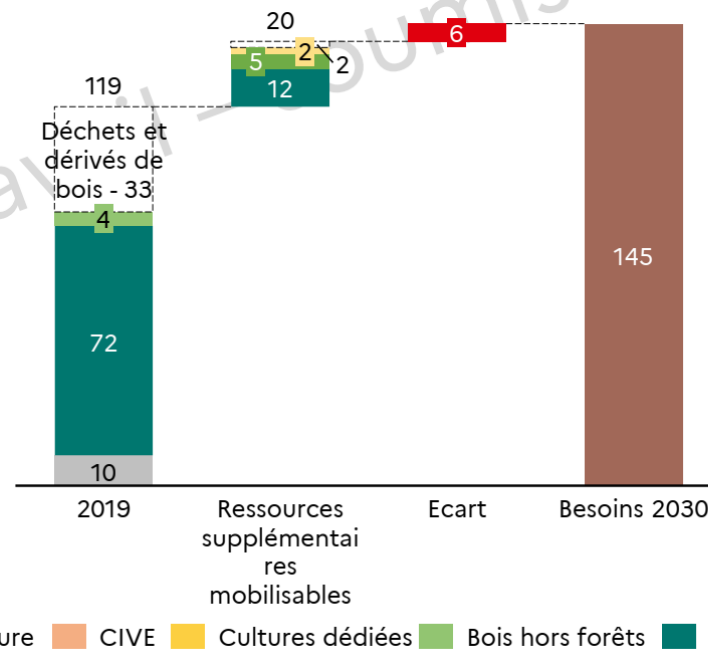
Ressources en bio-énergie (liquide), en TWh :



Biomasse solide : forte sollicitation de la biomasse forestière à prévoir

Pour l'industrie (jusqu'à 20-40TWh en 2030), la décarbonation des réseaux de chaleur (33TWh), la production d'élec. (+25TWh), le résidentiel (45TWh, -40%)

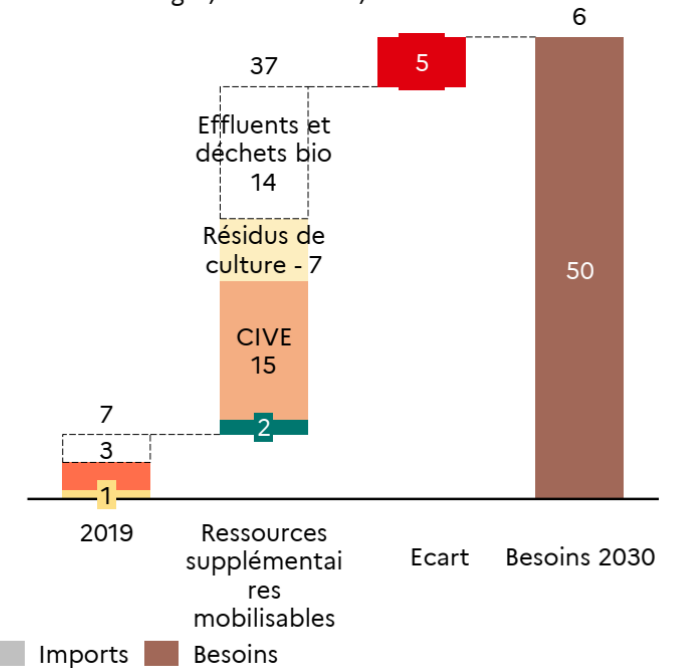
Ressources en bio-énergie solide, en TWh :



Biomasse gazeuse: enjeu de satisfaire les besoins via les effluents et les CIVE

Pour la chaleur haute intensité dans l'industrie (15-25TWh), le bâtiment (20TWh), les réseaux de chaleurs (+2), la production d'électricité (6TWh)

Ressources en biogaz, biométhane, en TWh :



Arbres et Cultures
cultures



Panneaux PV et
cultures



Agroforesterie
AgriVoltaisme

Les cultures et pâtures utilisent moins de 30% du rayonnement annuel incident

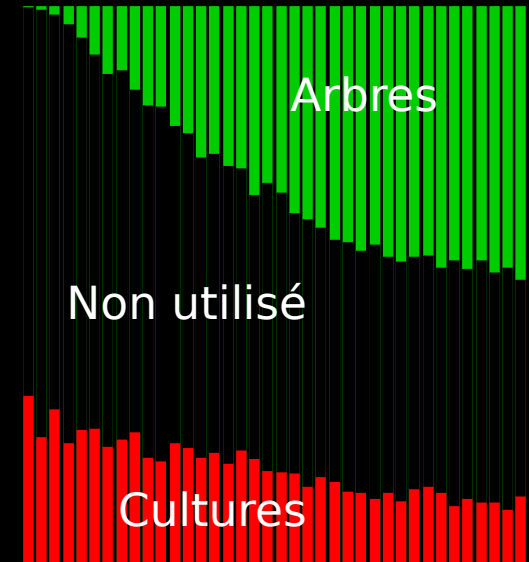
Agriculture

Agroforesterie

% du rayonnement incident intercepté



Années



Années

INRAE-Sun'R

Premier prototype mondial (Montpellier, 2





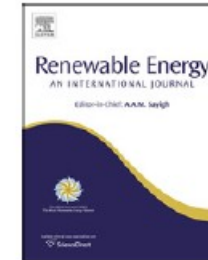


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Renewable Energy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/renene



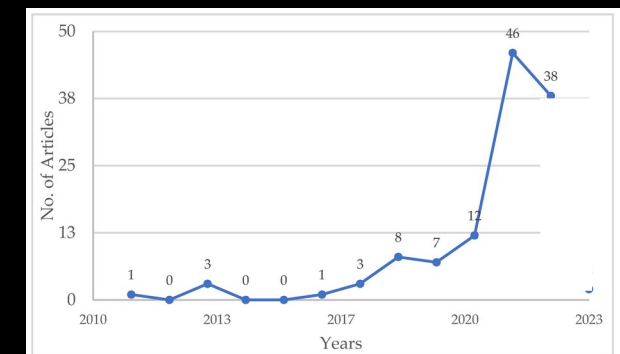
Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes

C. Dupraz^{a,*}, H. Marrou^a, G. Talbot^a, L. Dufour^a, A. Nogier^b, Y. Ferard^b

^aINRA, UMR System, 2, Place Viala, 34060 Montpellier Cedex, France

^bSun'R SAS, 7 rue de Clichy, 75009 Paris, France

Renewable Energy 2011. 36: 2725-2732



On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation

A. GOETZBERGER and A. ZASTROW

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme Oltmannsstrasse 22, D-7800 Freiburg, West Germany

(Received February 15, 1981)

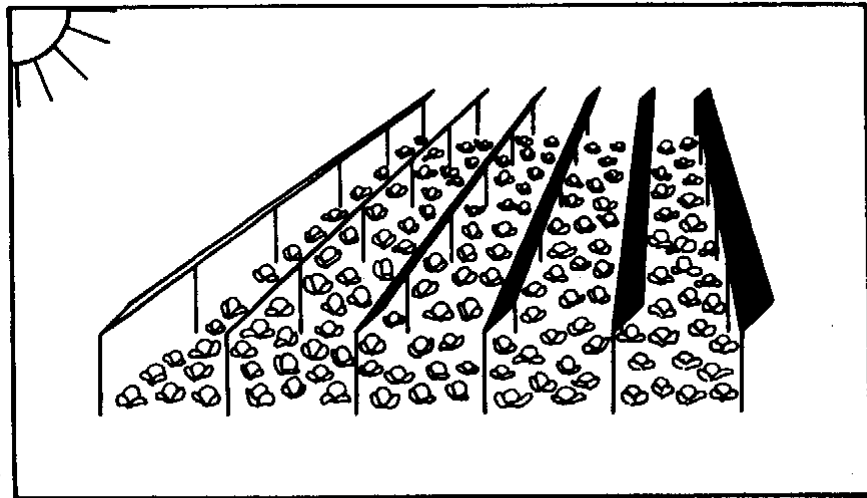
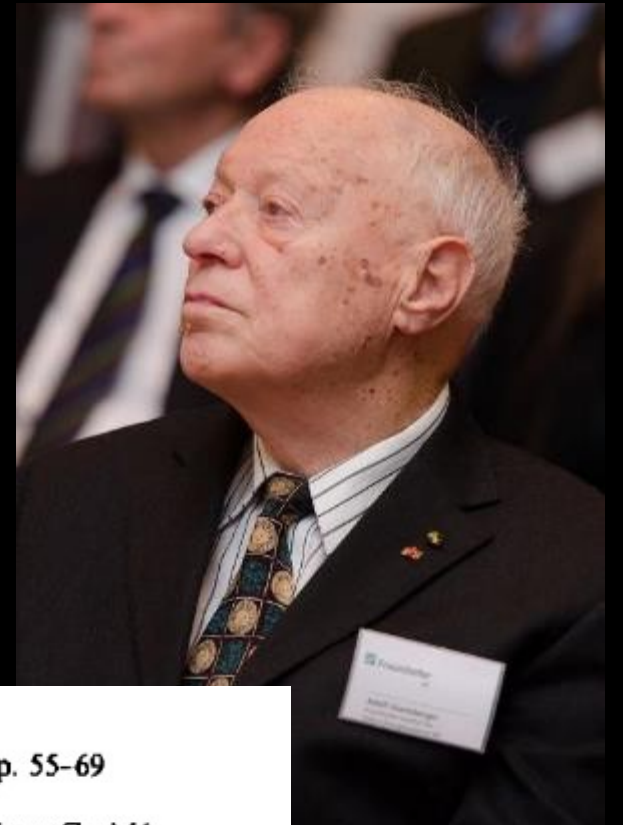


FIGURE 1 Model sketch of elevated collector field.

1981

Int. J. Solar Energy, 1982, Vol. 1, pp. 55-69
0142-5919/82/0101-0055\$06.50/0
© 1982 Harwood Academic Publishers GmbH
Printed in Great Britain

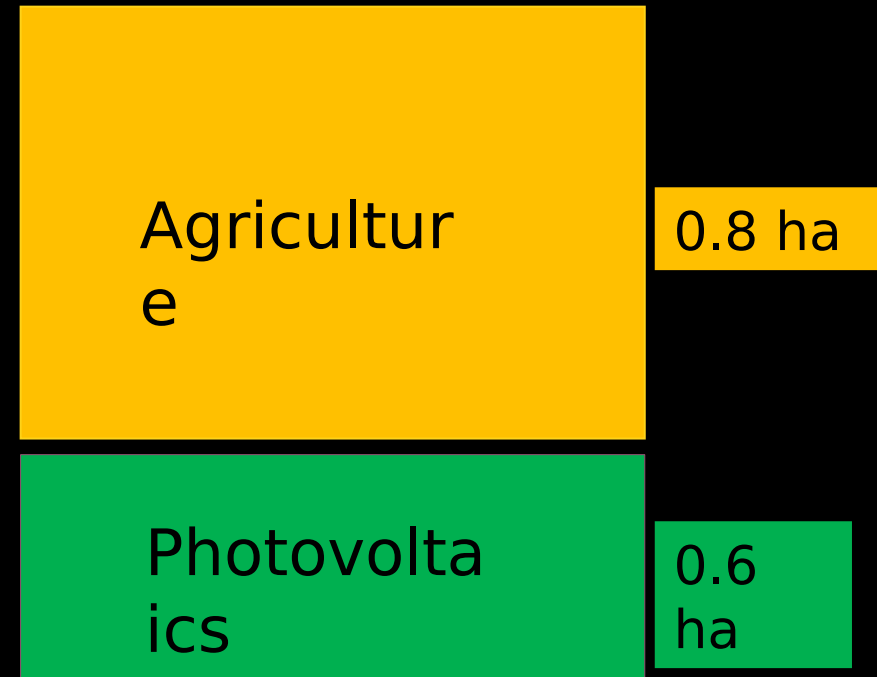


Dual use



1
ha

Single use



LER = 1.4 ha

Land Equivalent Ratio (LER) (Mead and Willey, 1980)

Land
Equivalent
Ratio

1.2 to 1.6

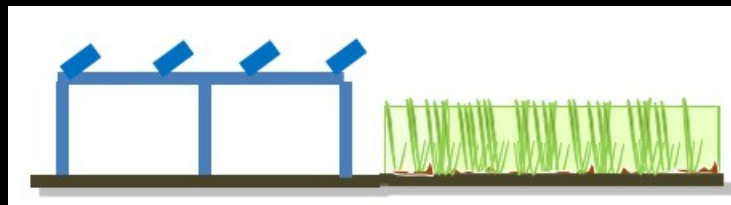
Poplars-cereals

14 years



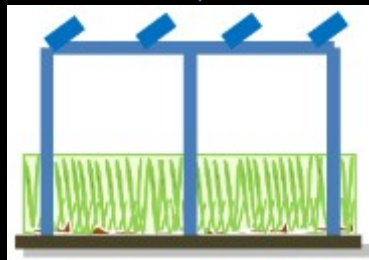
Quel LER en Agrivoltaïsme?

- Si les cultures étaient indifférentes à l'ombre...



1 ha

1 ha



1 ha

Maximum LER
= 2

What LER for Agrivoltaism?

- Mais ce n'est pas le cas!

Density of PV panels	% PV panels	% Crop yield	LER
Standard	100%	73%	1,73
Reduced	52%	83%	1,35

Marrou (2012)

**De forts LERS
peuvent être
obtenus avec de
faibles
rendements
agricoles**



Land Equivalent Ratio agrivoltaïque

1.3 to 1.7



Un LER de **1.5** signifie,

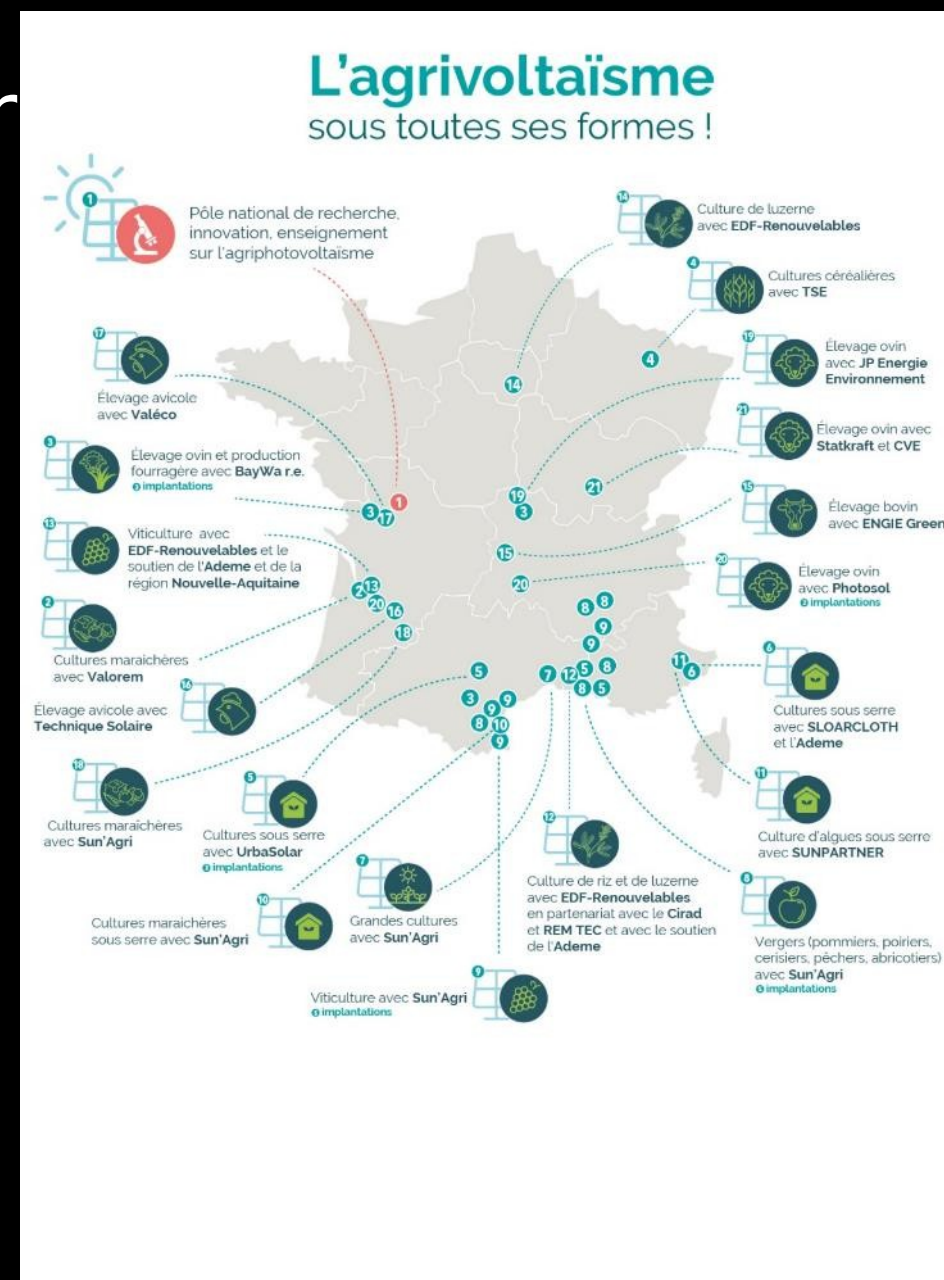
qu'une ferme agrivoltaïque de **100** ha

produit autant d'électricité et de nourriture

Qu'une ferme de **150** ha où les cultures et les panneaux photovoltaïques sont séparés

Recherches en agrivoltaïsme en France

- 14 années (depuis 2009)
- Innovation majeure : AV dynamique (Sun'Agri/INRAE)
- Etudes agronomiques (7 thèses)
- Nombreux partenaires industriels : Sun'R, Rem Tec, EDF Renouvelables, Photosol, Engie Green, Urbasolar, Baywa.re, SunPartner, SolarTub, Valorem, Valeco, Photosol, TSE, Next2Sun, etc...



15 ans de recherche collaborative - 7 Thèses

The R&D



2009-

2013-

2017-

> 2019

2015
SUN'AGRI 1
Proof of concept

2017
SUN'AGRI 2
Products and softwares development

2020
SUN'AGRI 3
Demonstration phase

COMMERCIAL DEVELOPMENT

1st FIXED SITE

1st DYNAMIC SITES

7 EXP. SITES

FRANCE

14 COMMERCIAL SITES

INTERNATIONAL



Innovation awards

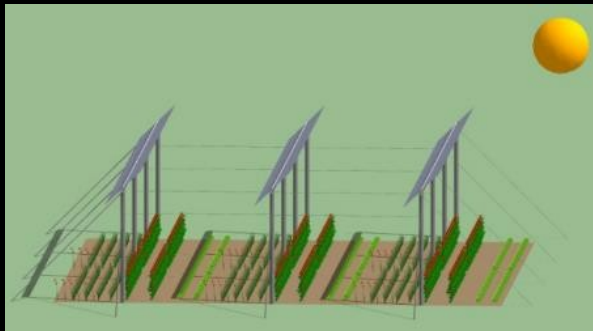


7 research Labs

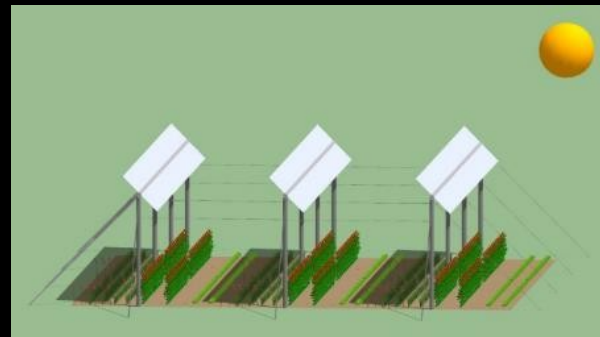


Agrivoltaïsme dynamique

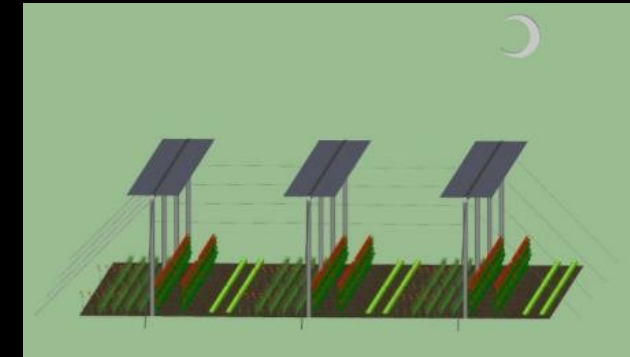
Cas 1 : La culture a besoin de beaucoup de lumière (effacement = tracking inversé)



Cas 2 : La culture a besoin de protection contre l'excès de rayonnement ou la chaleur (tracking solaire)



Cas 3 : Réduction des pertes d'énergie nocturne pour réduire les risques de gel ou réchauffer le sol



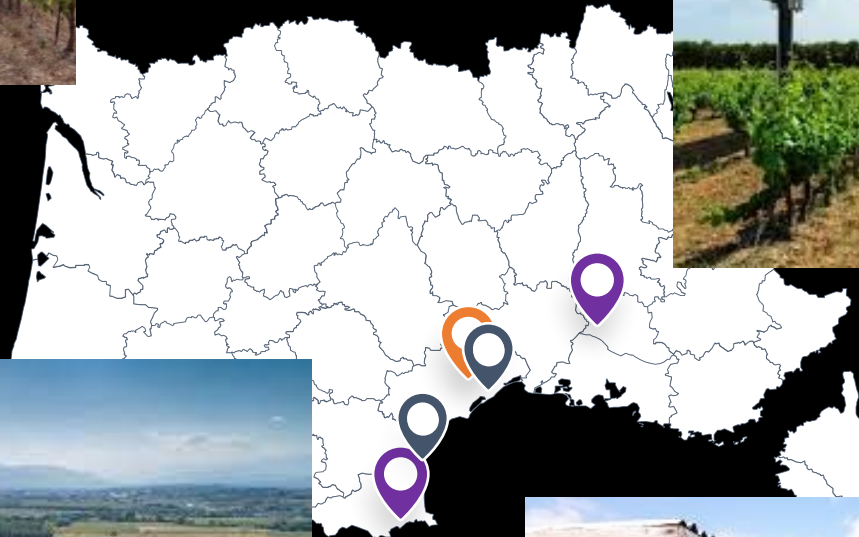
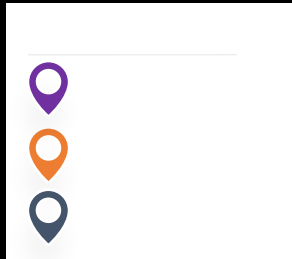
Des panneaux photovoltaïques mobiles pour s'adapter au changement climatique

Production électrique réduite de 30% en tracking inversé.



Experimentations viticoles

Sun'Agri R&D program



Agrivoltaïsme viticole



Tresserre (66)



Nissan lez
Ensérune (34)



Agrivoltaïsme viticole



Piolenc (84)

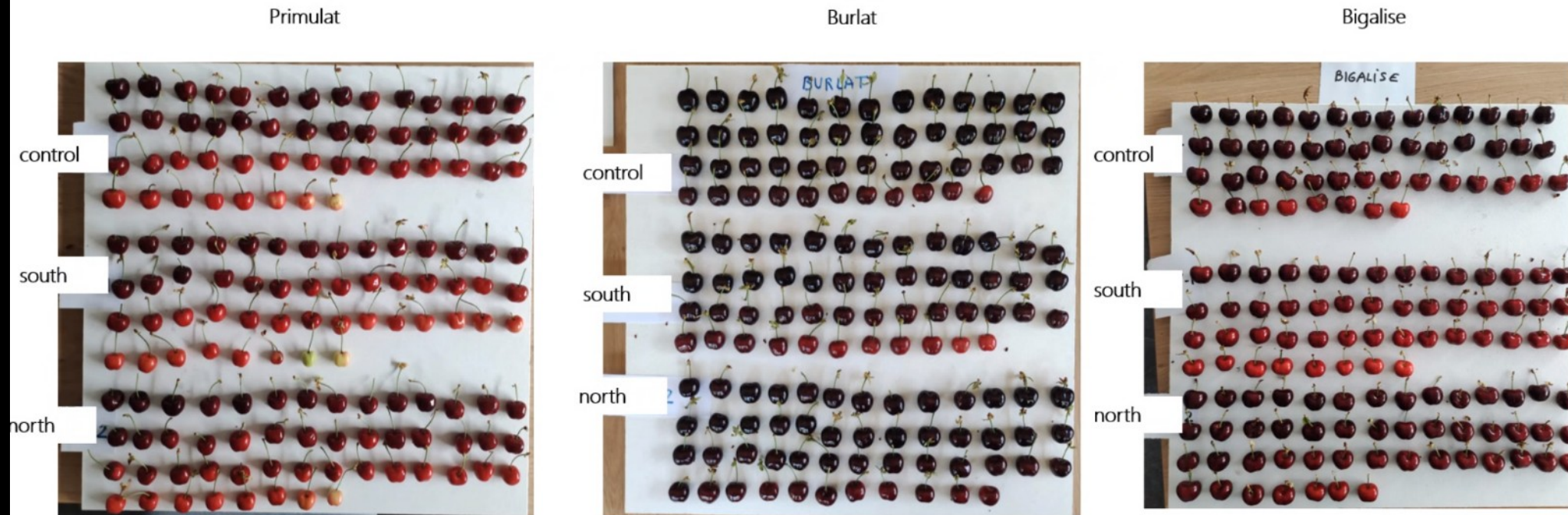


- Les vignes abritées résistent mieux aux canicules
- Besoin en eau réduit (de 12% à 34%)
- Profil aromatique amélioré :
 - +13% d'anthocyanes
 - + 9% à 14% d'acidité
- Degré d'alcool réduit et vendanges retardées

- Utilisation de la structure pour divers services à la vigne (irrigation, filets antigrêle, palissage)

Impact sur la qualité des produits

- Nombreuses études en cours sur arbres fruitiers, vigne
- Effets ténus, parfois positifs (degré alcoolique diminué en vigne), parfois négatifs (coloration fruits)
- Effets négatifs à faible impact sur valeur commerciale (mais très variable d'une espèce à l'autre)



Impact écologique des centrales Agrivoltaiques

- Neutre vis-à-vis de la grande majorité des taxons
- Adaptation rapide de certaines espèces d'oiseaux (hirondelles)
- Favorables à certains insectes (papillons)
- Transparents vis-à-vis de la grande faune (au contraire des centrales au sol clôturées)
- Gênent la chasse des rapaces
- Les chauve-souris ne vont pas beaucoup au centre des centrales

Suivi écologique en phase exploitation – Tresserre (66)

❖ 1^{ers} résultats qualitatifs sur 3 années – 2020 à 2022 : 

Taxons	Nombre d'espèces	Observation
Rhopalocères	18	- Richesse spécifique faible mais cohérente - Repos sous ombrage
Odonates	2	- Habitat peu favorable - Individus en transit
Orthoptères	4	- Habitat peu favorable - Espèces thermophiles
Chiroptères	16	- Utilisation pour les déplacements (Grand Rhinolophe) - Chasse active sur l'ensemble du site - Activité plus faible sous AVD



Grand Rhinolophe



Machaon



Criquet égyptien



Gomphe à forceps méridional

CONSEIL NATIONAL DE LA PROTECTION DE LA NATURE

SÉANCE DU 19 JUIN 2024

DÉLIBÉRATION N° 2024-16

AUTOSAISINE DU CNPN RELATIVE À LA POLITIQUE DE
DÉPLOIEMENT DU PHOTOVOLTAÏQUE ET SES IMPACTS SUR LA BIODIVERSITÉ

Une faille de la loi APER...

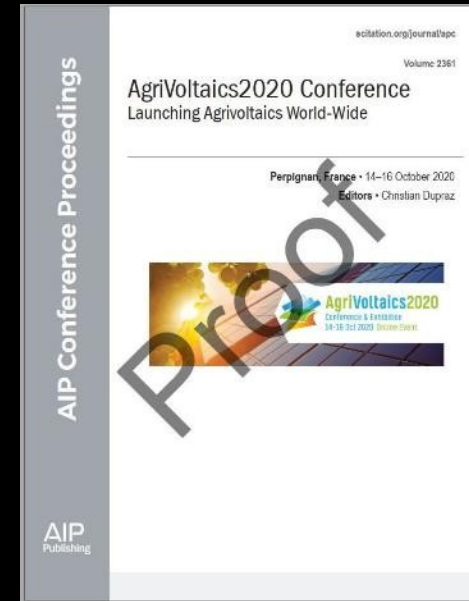
4.4 L'évaluation environnementale

Les installations d'une puissance supérieure ou égale à 1MWc sont soumises à évaluation environnementale systématique, ce qui implique la réalisation d'une étude d'impact environnementale. Les installations d'une puissance comprise entre 300 kWc et 999kWc sont soumises à évaluation environnementale au cas par cas. Les installations sur ombrières et toitures ne sont pas soumises à évaluation environnementale (C. envir., art. R. 122-2).

A noter que le seuil de déclenchement de l'évaluation environnementale systématique a été augmenté en 2022 : il était de 250 kWc pour passer à 1000kWc. Les « petits projets » échappent ainsi à cette évaluation préalable et peuvent localement détruire des espèces protégées faute de réalisation d'une étude d'impact sur la faune et la flore présentes sur le site.

Recherches en agrivoltaïsme : une accélération mondiale récente

- Déjà cinq congrès mondiaux sur le sujet
 - 2020 : France, Perpignan, virtuel
 - 2021 : Allemagne, virtuel
 - 2022 : Italie, présentiel
 - 2023 : Corée du sud, présentiel
 - 2024 : Denver, USA, présentiel
- Prochain congrès mondial : Allemagne en 2025



Un foisonnement d'innovations

- Semi-transparent PV modules
- Folded systems
- Mobile systems on skis
- Bi-facial vertical systems
- Assymetrical glasshouses designs
- Tubular Photovoltaic systems
- Organic Photovoltaic systems
- Et bien d'autres ...

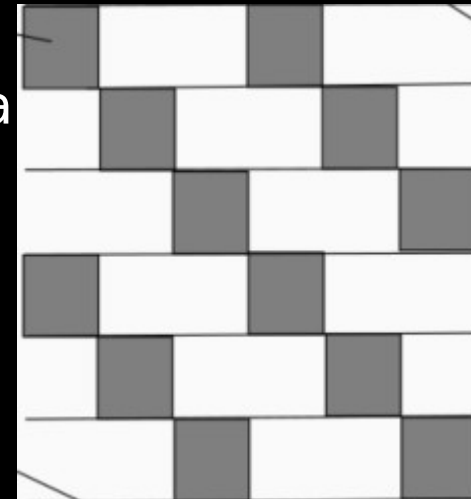


Chine

- 1 GW project with goji berries cultivation in Ningxia Province (Huawei)
- Smart PV (trackers)

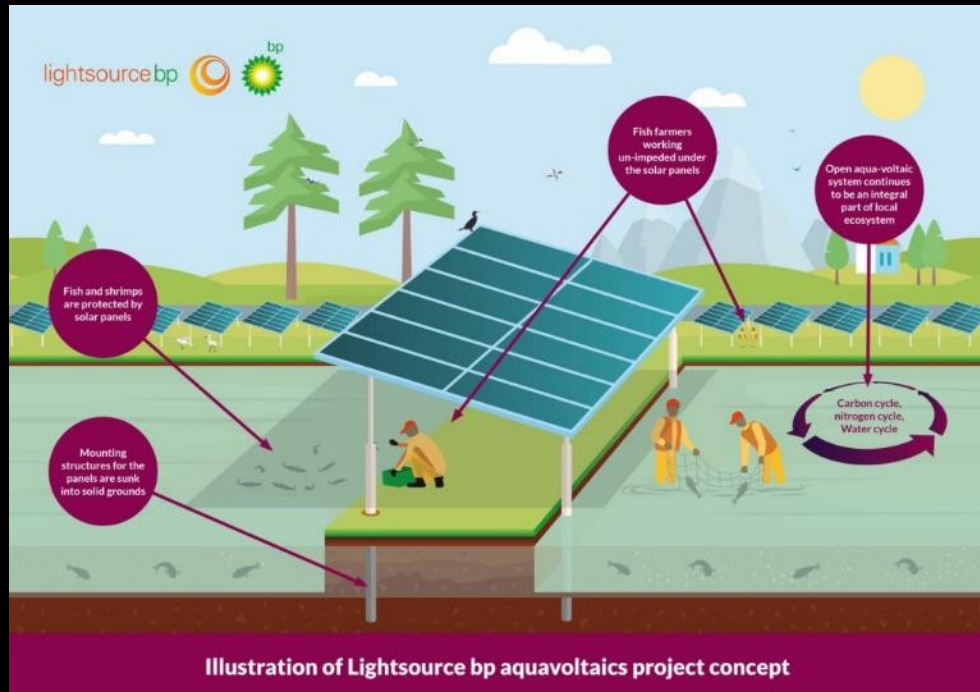


- Water saving (-30%)
- Higher biodiversity (desert a



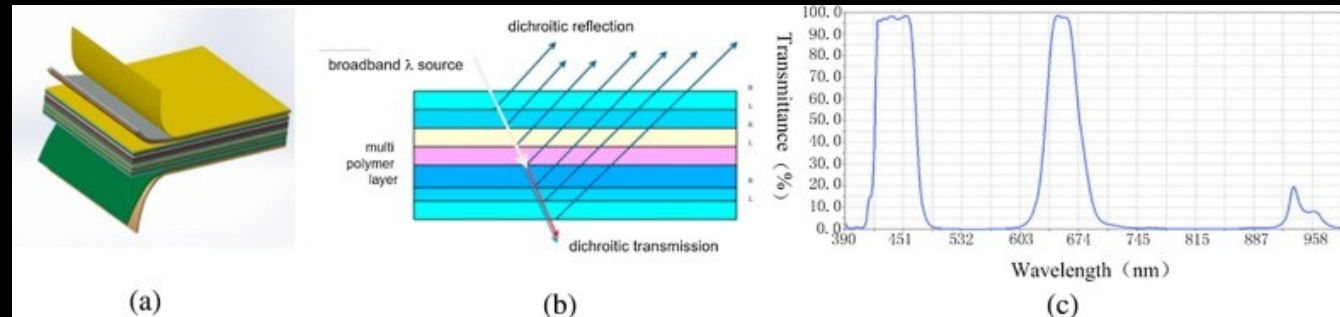
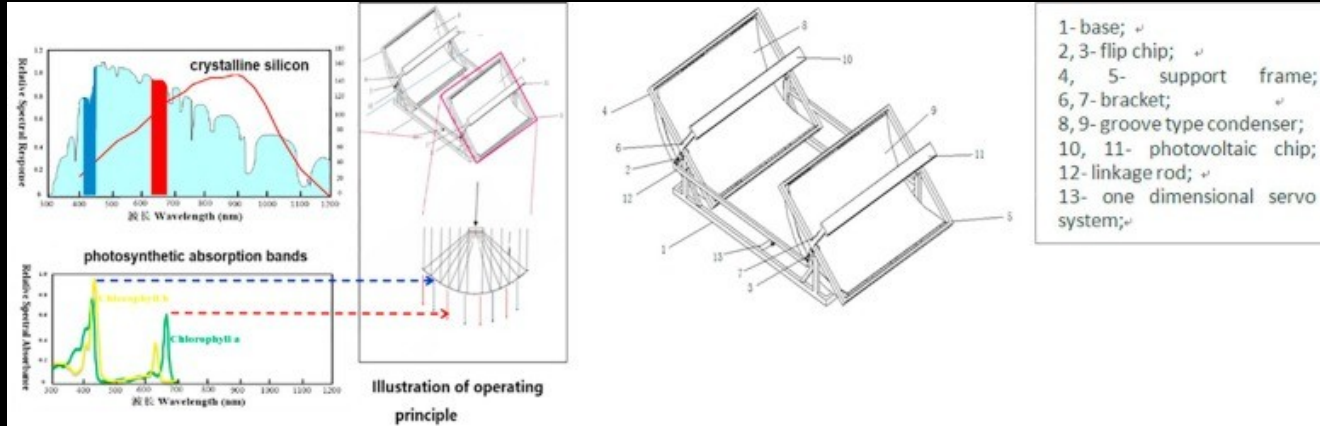
Taiwan

- Leaders de l'aquavoltaïsme



A novel agricultural photovoltaic system based on solar spectrum separation

Wen Liu ^{a, b}, Luqing Liu ^{a, b}   [✉], Chenggang Guan ^c, Fangxin Zhang ^{a, b}, Ming Li ^b, Hui Lv ^d, Peijun Yao ^a, Jan Ingenhoff ^b



Fortes oppositions... qui évoluent

Réservé aux abonnés

Landes. « On devient producteurs de photons et pas d'alimentation » : feu vert donné au projet Terr'Arbouts, le Modef et la Sepanso réagissent

Lecture 2

Accueil • Landes • Saint-Gein



Mélanie Martin, présidente du Modef dans les Landes. © Crédit photo : Archives Matthieu Sartre

HORIZONS 28 - VENDREDI 3 FÉVRIER 2012

FDSEA

FONCIER La FDSEA rappelle sa position sur le développement de projets d'installations photovoltaïques au sol.

Pas de panneaux photovoltaïques au sol sur les terrains cultivables

Notre département comme bien d'autres, n'échappe pas aux projets photovoltaïques quels qu'ils soient : installations de panneaux sur des hangars agricoles ou création d'un parc photovoltaïque au sol (exemple du parc de Crucey-Villages).

la FDSEA a réaffirmé sa position.

Les sites d'implantation à privilégier

Il y a aujourd'hui suffisamment de place sur les toitures pour permettre de répondre aux enjeux du développement durable et évi-

celle de nourrir les hommes. Aussi, les projets d'implantation au sol ne devront voir le jour que sur des terrains non cultivables, tels les friches industrielles ou artisanales, les sites pollués, les anciennes carrières... Les espaces sur lesquels l'activité agricole est présente aujourd'hui ont une



La France Agricole @FranceAgricole · 3 Apr 2020

@InstitutElevage et @EleveursOvins développent avec Neoen une cellule de recherche pour répondre à une demande forte de données agronomiques et zootechniques sur le pâturage d'ovins sous des panneaux photovoltaïques.

Business

Sun'Agri et Engie Green s'associent pour le déploiement de l'agrivoltaïsme

À la une > ÉNERGIE

L'agrivoltaïsme : « escroquerie verte » ou vrais « énergiculteurs » ?

ÉNERGIE



Sun'Agri, Engie, Total... L'agrivoltaïsme progresse en France, y compris chez les géants de l'énergie

signent une
me

Le gouvernement a désigné le 1er avril une salve de 288 projets dans les énergies renouvelables. C'est également l'un des premiers appels d'offres pour l'agrivoltaïsme, une filière qui intéresse de plus en plus de gros acteurs de l'énergie comme Total..



développement de solutions agrivoltaïques.

L'agrivoltaïsme est une approche innovante qui associe une production d'électricité photovoltaïque et une production agricole sur une même surface. Elle aide à valoriser des terres peu productives, très caillouteuses, sur des plateaux venteux ou encore trop exposées au soleil, rendant possible la diversification vers de nouveaux types de cultures, tout en produisant de l'énergie photovoltaïque. La démarche peut également faciliter la création d'emplois grâce à une augmentation de la productivité des exploitations.

Total Quadran et InVivo mutualisent leurs expertises via trois engagements :

- La mise en place d'une cellule recherche et développement sur l'évolution de l'agrivoltaïsme.



EDF et Rem Tec ont installé dans le département de la Seine-et-Marne, des panneaux photovoltaïques au-dessus d'un champ de luzerne. © Michael Ayach/Rem Tec

Des projets géants controversés

Exemple : Lot et Garonne, 2 000 hectares,
1 Md€ investment, 1 000 emplois, taxes
pour les collectivités locales

5 investisseurs : Valeco, Green Lighthouse, Neoen, Reden Solar et
Amarenco Construction
5 communes : Allons, Boussès, Sauméjan, Pompogne et Houeillès



Un projet géant de centrale solaire provoque l'émotion dans les Landes

Par Guillaume Guichard

Publié le 12/01/2021 à 19:58, mis à jour le 12/01/2021 à 19:58



AGRICULTURE - PÊCHE

Les autorités donnent le feu vert pour le vaste projet agrivoltaïque Terr'Arbouts dans les Landes

C'est l'un des plus gros projets de la sorte en France. La préfecture vient de délivrer les permis de construire pour le projet nommé Terr'Arbouts. Il prévoit l'installation de 200 hectares de panneaux solaires sur 700 de terres agricoles, dans l'est des Landes.

- Label AFNOR Agrivoltaïsme sur culture
- Label Agrivoltaïsme élevage en préparation
- Pour éviter les faux projets



Conception

Construction

Exploitation



Association Nationale créée le 9 Juin 2022

Défend une régulation et un agrivoltaïsme protecteur des cultures

Contre-Association

Souhaite le moins d'encadrement possible

« Priorité à l'agilité »



Aurons nous vraiment besoin de
l'agrivoltaïsme ?

Le problème de la ressource en espace :

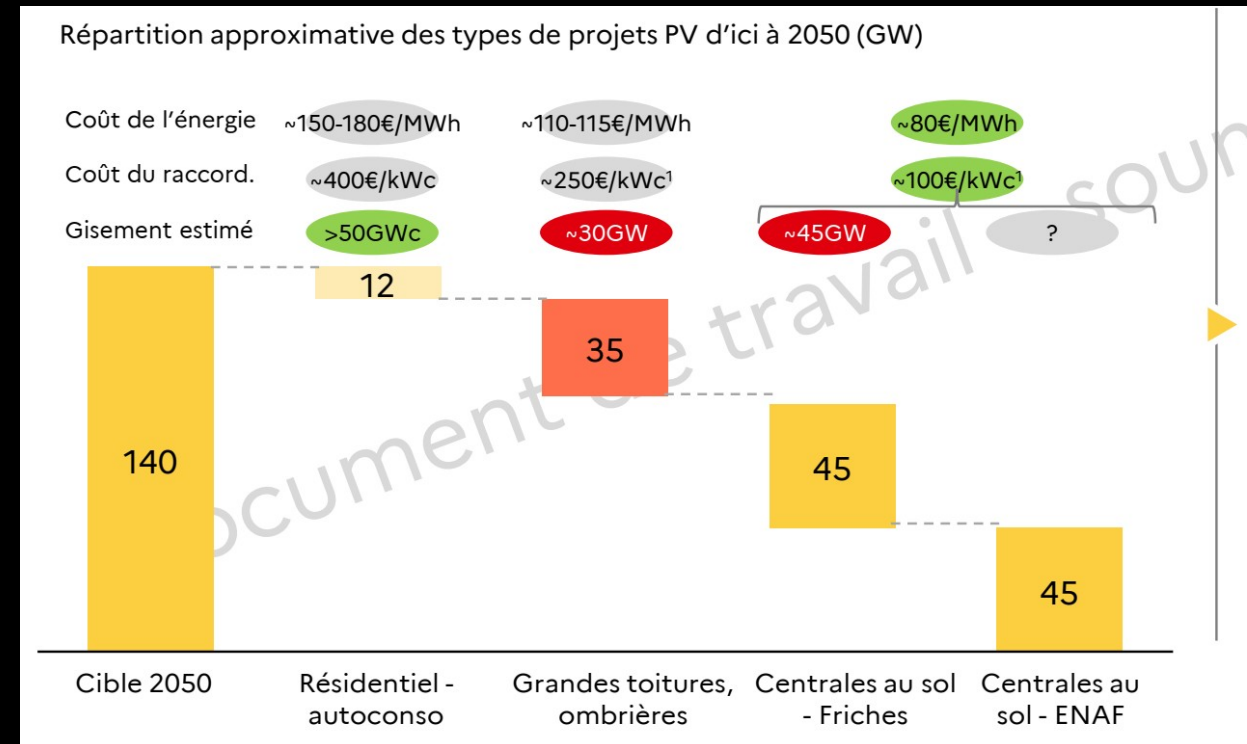
Toitures, ombrières de parking, zones polluées et friches industrielles sont des surfaces adaptées pour des centrales photovoltaïques, MAIS elles sont insuffisantes ou présentent des contraintes rendant l'électricité produite très peu compétitive

Ambition : 35 GWc d'ici 2028 pour 23 GWc disponibles sur ces gisements.

Annonces Président Macron 10 février 2022 : **100 GWc d'ici 2050**

Dernières estimations SGPE : 140 GWc

Où trouver les surfaces supplémentaires ?



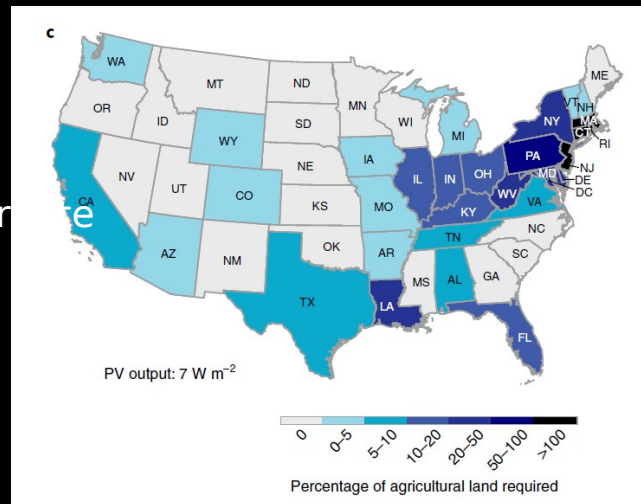
Nous aurons besoin de l'agrivoltaïsme

(dans la plupart des pays européens).

50% de l'électricité PV sera produite à partir des terres agricoles

Le Plan « Aglectric » aux USA

- Centrales agrivoltaïques à chaque aire d'autorité



Assemblée nationale,
Commission du Développement
durable,
4 février 2024



Antoine Peillon,
Sec. Gén. à la
planification écologique
France nation verte



Jean-Luc Fugit,
Président Conseil
Supérieur de
l'Énergie

Ordres de grandeurs :

1 ha de PV au sol = +/- 1 MWc = +/- 1.3 GWh

1 réacteur nucléaire = +/- 5 000 ha GM-PV (1GWc)

56 réacteurs nucléaires = +/- 250 000 ha de PV au sol = +/- 1 % de la SAU française

PV au sol : GCR (taux de couverture) = 50%

Le dilemme du taux de couverture

- $GCR = \text{surface de panneaux} / \text{surface au sol}$
- De faibles GCR permettent une production agricole « presque normale »
- De faibles GCR induisent une électricité plus chère
- Des structures de support « low cost » seront peut-être la clef du succès



Le précédent fâcheux des serres photovoltaïques



- 50% GCR = trop sombre pour la plupart des cultures

Panneaux semi-transparents et voile mobile réflecteur (Insolight)



Qui aime l'ombre? La dispute des framboises et des épinards



- Les framboises aiment l'ombre (mais aussi le thé, les baies de goji, peut-être les kiwis ou les prairies sèches)
- Les épinards n'apprécient pas, tout comme le soja, le riz, le maïs
- Pour certaines cultures on a des résultats très contradictoires : pommes, olives, tomates...
- Sur tomates, résultats opposés en Europe et en Inde...

Japon : une réglementation qui demande l'impossible aux agriculteurs



Lizuka, Sosa, Chiba, Japan

Blé

Distance entre les rangées de poteaux : 4 m

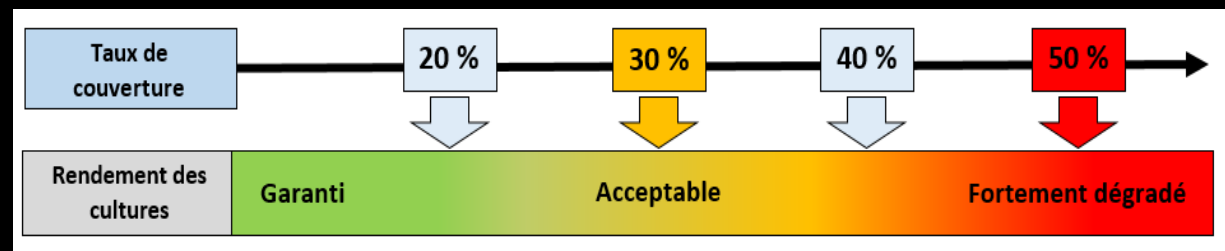
Surface cultivée : 75 %

Taux de couverture : 33%

80% au Japon
66% en Allemagne
90% en France

Exemple de site japonais où il est impossible de respecter la loi (rendement relatif exigé : 80%)

- Les centrales PV au sol classiques ne sont pas compatibles avec l'agriculture
- Le graal en AV : maintenir 100% du rendement agricole
- Taux de couverture divisé par deux x surface double = même production électrique
(mais coût plus élevé de l'électricité)
- Certaines cultures peut-être plus compatibles avec l'ombre (arbres fruitiers, vignes, petits fruits, prairies sèches)



Agrivoltaïsme ?

Revenus électriques > 300 fois le revenu ovin

Les ovins ne remplaceront pas tous les systèmes de production

Joyeux rentiers?

Gros problèmes de voisinage et d'acceptabilité sociale



Le risque de l'abandon de l'agriculture

Les revenus électriques écrasent les revenus agricoles

Sans régulation...

La production agricole deviendra anecdotique (moutons, ruches, service écosystémiques)

Les taux de couverture se rapprocheront des standard de PV au sol

L'abandon de l'agriculture est probable

Les loyers agrivoltaïques ne justifieront jamais de faire des cultures déficitaires

Partager le gâteau agrivoltaïque

- Des objectifs cohérents avec la planification énergétique
- Pour la France:
 - Ni trop peu : > 10 000 ha
 - Ni trop : < 1 Mha
 - 100 000 – 200 000 ha est un objectif réaliste (50 à 100 GWc)
- Le gâteau est donc limité
- Actuellement, plus d'un million d'hectares sont pré-contractualisés!
- Il y aura beaucoup de déçus

Comment améliorer l'acceptabilité des projets?

- Limiter la dimension des projets pour en faire bénéficier plus d'agriculteurs? (1ha? 5 Ha? 10 ha? 100 ha?)
- 100 000 ha d'AV peuvent être 100 projets de 1000 ha ou... 100 000 projets de 1 ha (modèle japonais)
- Mutualiser la rente agrivoltaïque
- Limiter le montant des loyers agrivoltaïques pour casser la spéculation foncière
- Financements participatifs

Une variété de systèmes agrivoltaïques

- Grandes centrales

- Peu nombreuses, peu de bénéficiaires
- Proches des postes sources du réseau RTE
- Electricité très compétitive
- Production électrique de masse

- Petites centrales

- Nombreuses, sur tout le territoire
- Peuvent être loin des postes sources
- Electricité plus chère
- Soutien la stabilité du réseau en injectant des électrons en aval du réseau
- Auto-consommation possible (tracteurs électriques, production d'engrais azoté à la ferme)

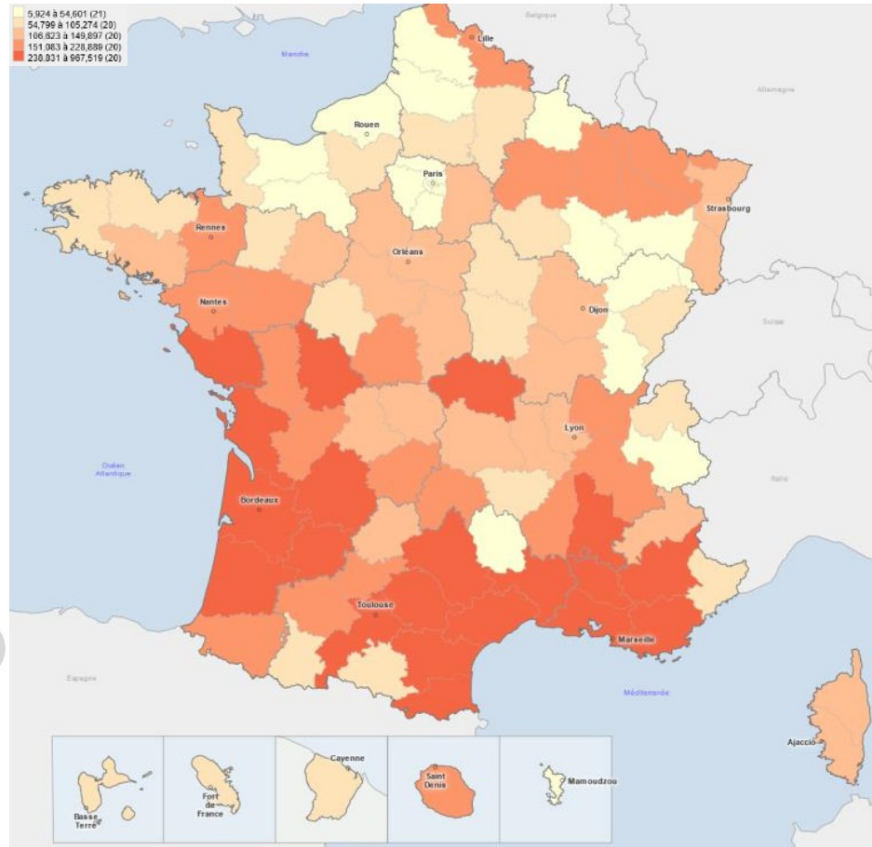
Loi sur l'accélération des énergies renouvelables (10 mars 2023)

- Interdit le PV au sol en zone agricole et forestière (sauf friches de « longue » durée repérées dans un document-cadre)
- Définit l'agrivoltaïsme comme un outil au service de l'agriculture pour faire face au changement climatique
- Donne un pouvoir décisif aux CDPENAF (Avis conforme) et embarrassant aux maires (seuil de puissance 500 KWc)

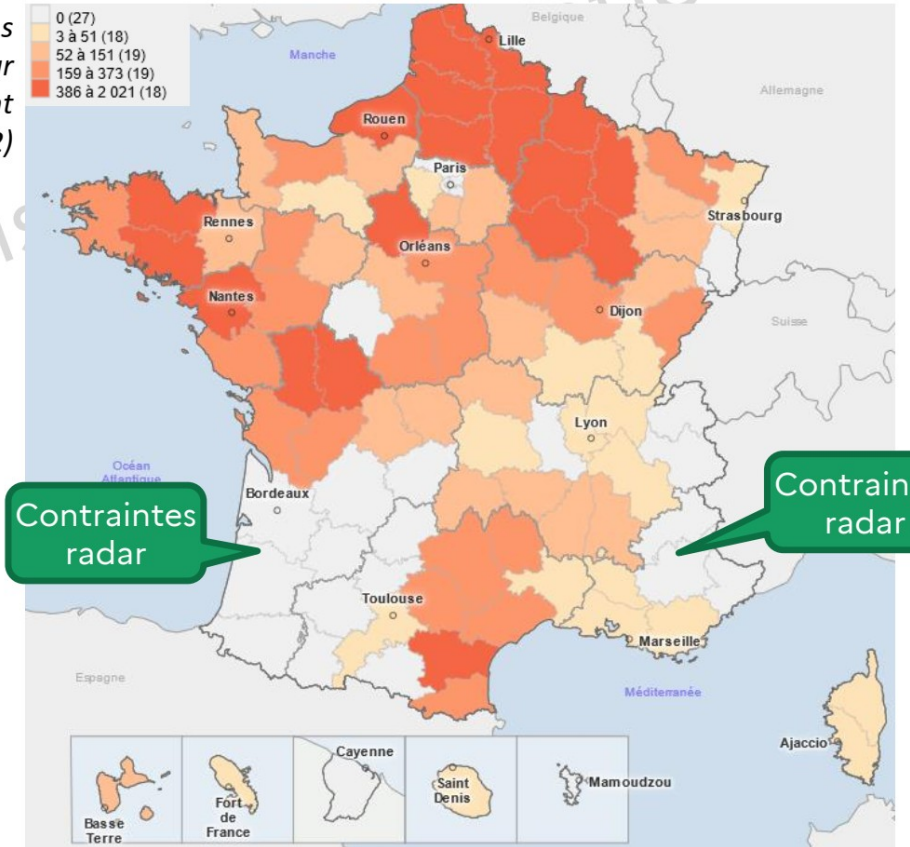
Un décret d'application... inapplicable?

- A choisi un contrôle a posteriori du rendement agricole
- Permet des taux de couverture élevés mais exige des baisses de rendement très limitées
- Recours de la Confédération paysanne en cours. Le conseil d'état réfléchit... Lentement
- Définit un taux de couverture en projection inutilisable

Installations PV par département (MW, 31/12/22)



Installations éoliennes par département (MW, 31/12/22)



Contraintes radar

Contraintes radar

Pour résumer

- L'agrivoltisme est un candidat sérieux au mix électrique du futur. La ressource est immense, et beaucoup mieux répartie que toutes les autres sources d'énergie
- Il reste du boulot pour concevoir des systèmes durables (graal = rendement agricole maintenu ou augmenté)
- L'AV peut contribuer à la décarbonation de l'agriculture (autoconsommation)
- Il faut calmer le far-west actuel, et retrouver le calme.
- Qui va confisquer la rente? Des choix politiques forts sont nécessaires
- Une centrale PV classique n'est pas compatible avec une production agricole normale



Merci pour votre
écoute