

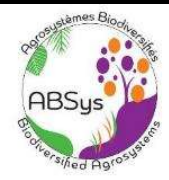
Agrivoltaïsme

Mieux utiliser la lumière du soleil
Enjeux, Potentiel, Controverses



Christian Dupraz

INRAE, UMR Absys, Université de Montpellier, France



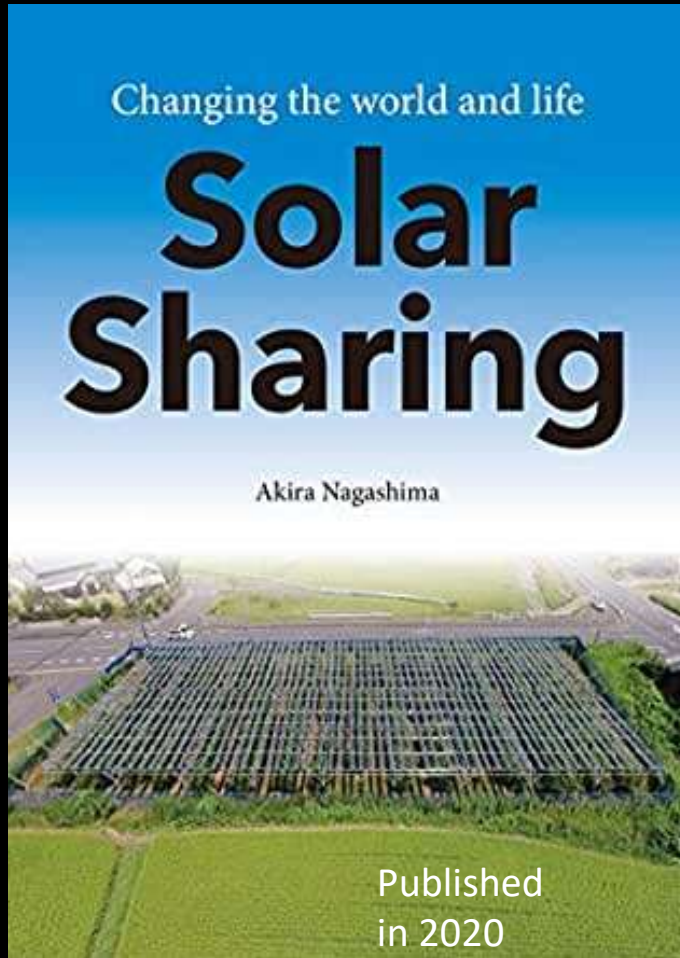








Japon









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?
 - Biomasse et résidus? -> 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



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 ou méthanisation -> Moteur thermique ->	60 000 km	
• panneaux photovoltaïques -> electricité -> e-carburants de synthèse (PTL) -> Moteur thermique ->	450 000 km] Production agricole alimentaire maintenue
• panneaux photovoltaïques -> electricité -> H ₂ -> Pile à combustible -> Moteur électrique ->	900 000 km	
• panneaux photovoltaïques -> electricité -> Moteur électrique ->	3 250 000 km	

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

Arbres et Cultures



Agroforesterie

Panneaux PV et cultures

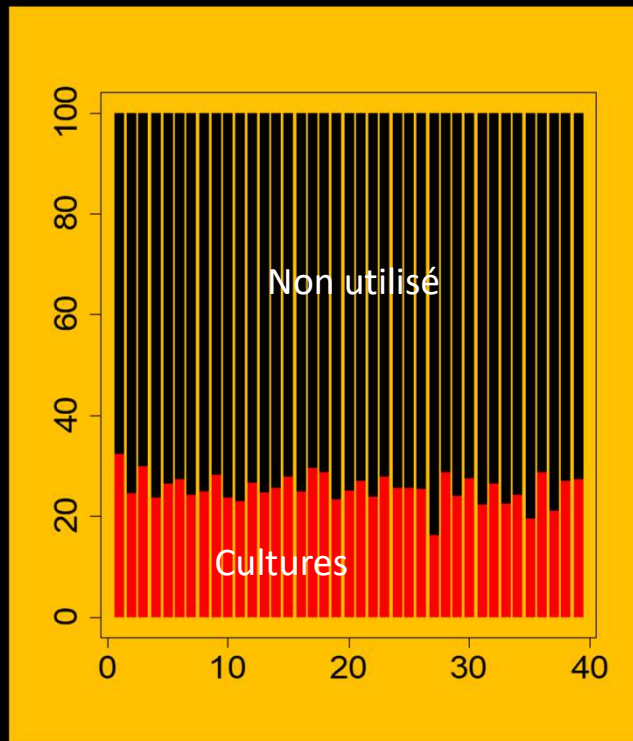


AgriVoltaisme

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

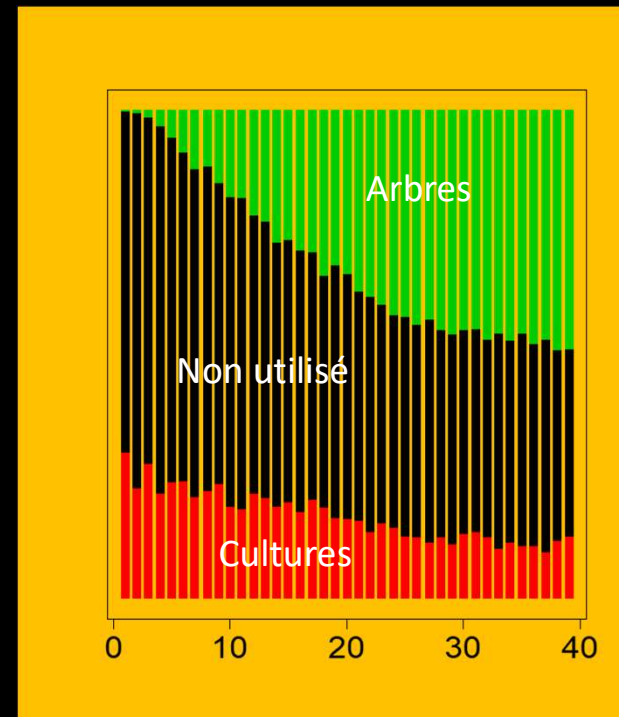
Agriculture

% du rayonnement
incident intercepté



Années

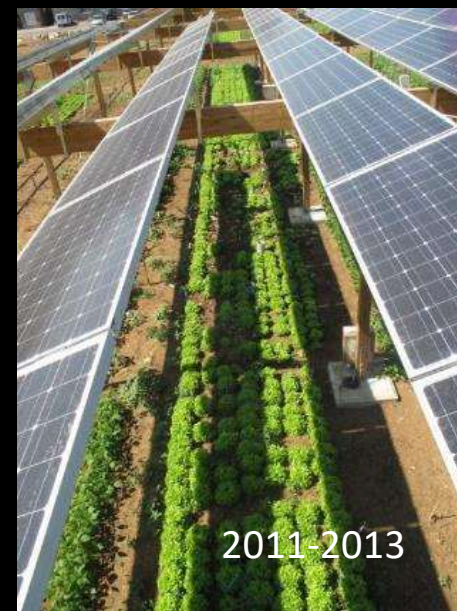
Agroforesterie



Années

INRAE-Sun'R

Premier prototype mondial (Montpellier, 2010)







Contents lists available at ScienceDirect

Renewable Energy

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



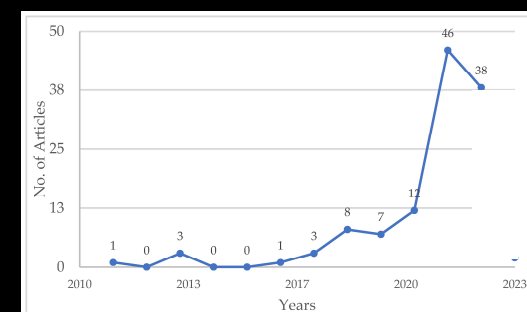
Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes

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

^a INRA, UMR System, 2, Place Viala, 34060 Montpellier Cedex, France

^b Sun'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)

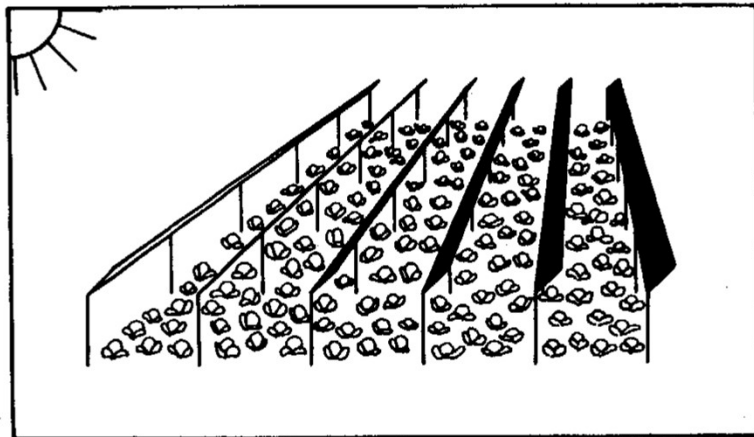


FIGURE 1 Model sketch of elevated collector field.

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

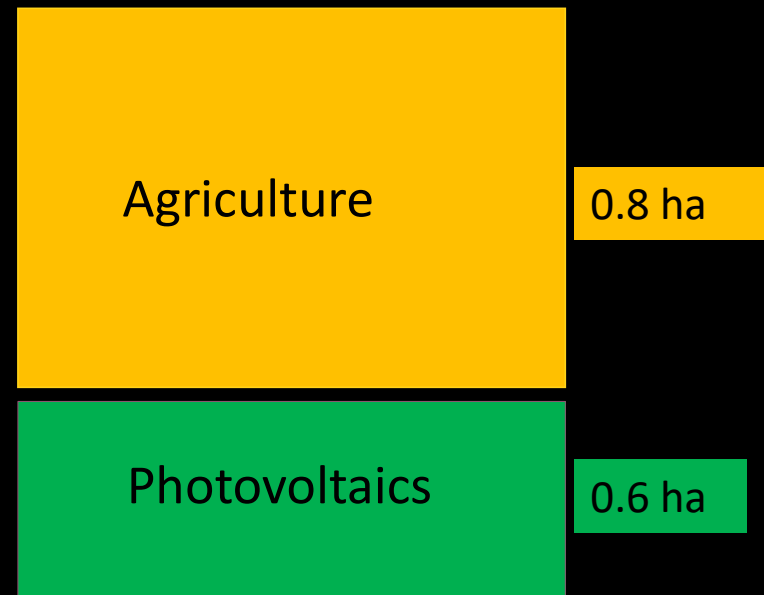


Dual use



1 ha

Single use



LER = 1.4 ha

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

Land
Equivalent
Ratio

1.2 to 1.6

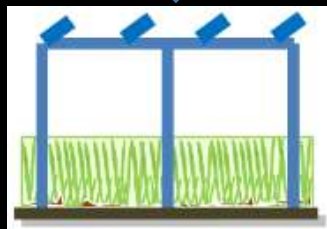
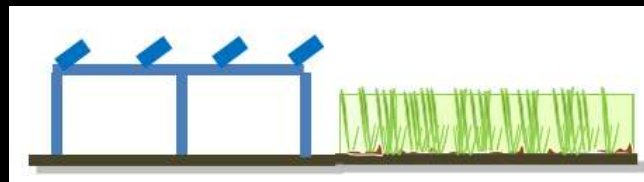
Poplars-cereals

14 years



Quel LER en Agrivoltaïsme?

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



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



Marrou *et al*, 2013; Valle *et al*, 2017

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

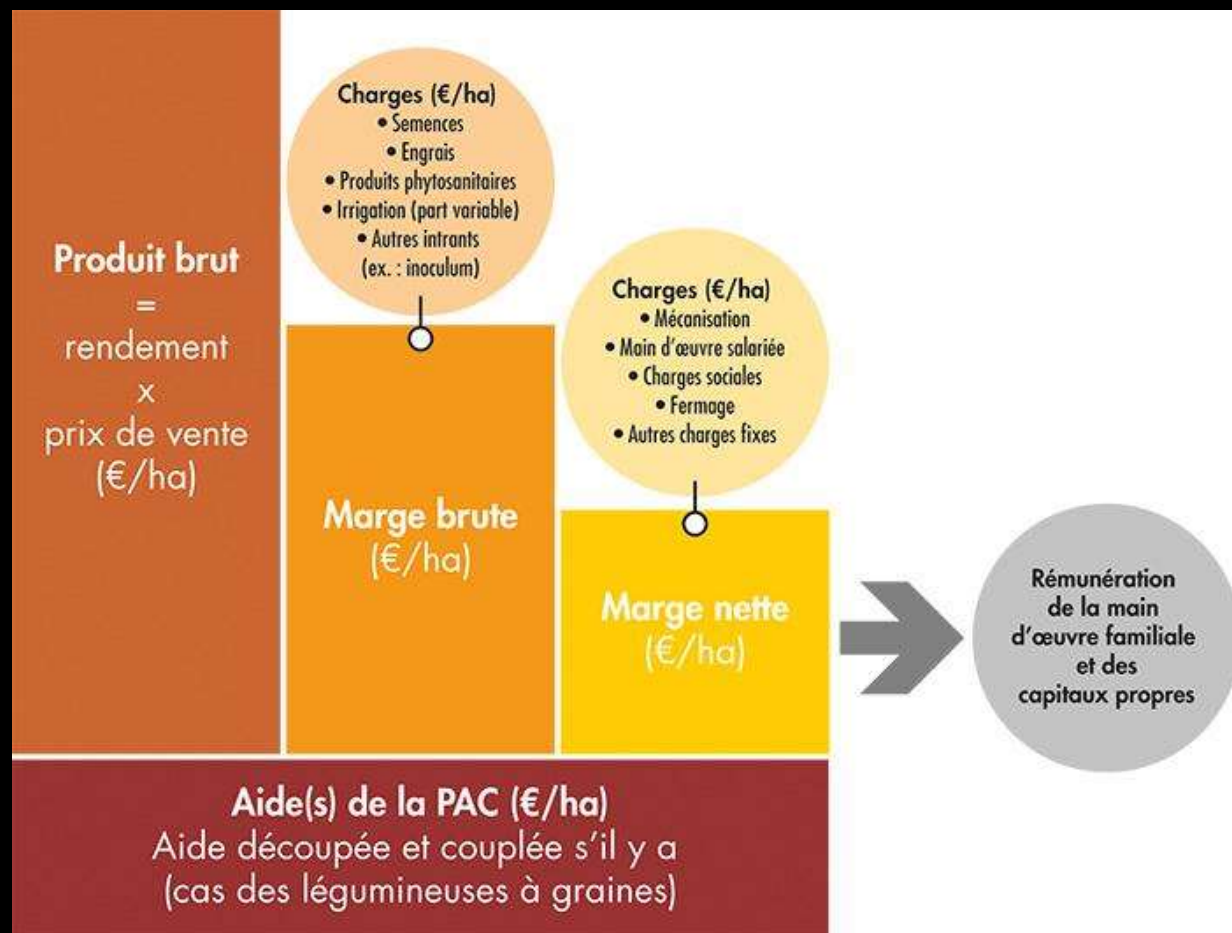
Questions de recherche sur les cultures en agrivoltaïsme

- Quelles espèces sont adaptées aux systèmes agrivoltaïques
- Comment mesure t-on rigoureusement les rendements agricoles en agrivoltaïsme?
- Y a –t-il vraiment des espèces d’ombre et de lumière?
- L’ombre d’hiver et l’ombre d’été? Quels impacts sur les productions agricoles?
- Les plantes annuelles, pérennes ou les pâtures se comportent elles différemment à l’ombre?
- Quels services attendre des systems agrivoltaïques? En particulier dans le contexte du changement climatique?
- Les modèles de culture prévoient ils correctement le comportementdes cultures à l’ombre?
- Les performances des cultures sous ombrières filets ou en agroforesterie peuvent-ils être extrapolés à l’agrivoltaïsme

Sans partage du soleil, pas d'agrivoltaïsme

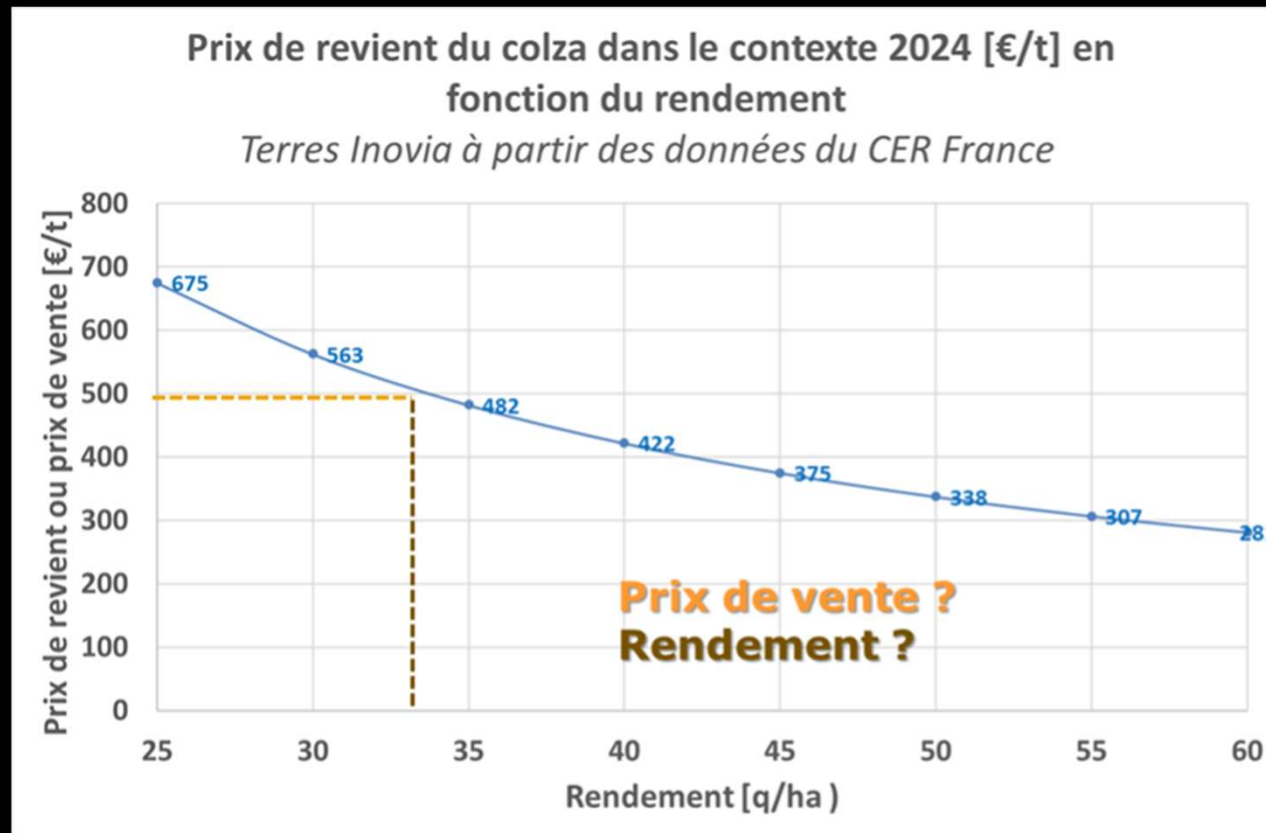
- Si la “culture” n'utilise pas le soleil ce n'est pas de l'agrivoltaïsme
 - Champignons
 - Elevage hors sol
 - Pisciculture en bassins (nourriture importée)
 - Volailles et monogastriques
- Si le sol ne produit pas de biomasse utile, il s'agit d'abris d'élevage
- PV flottant peut être très vertueux (réduction température de l'eau, réduction croissance des algues, oxygénation eau)

Le problème des faibles marges nettes agricoles

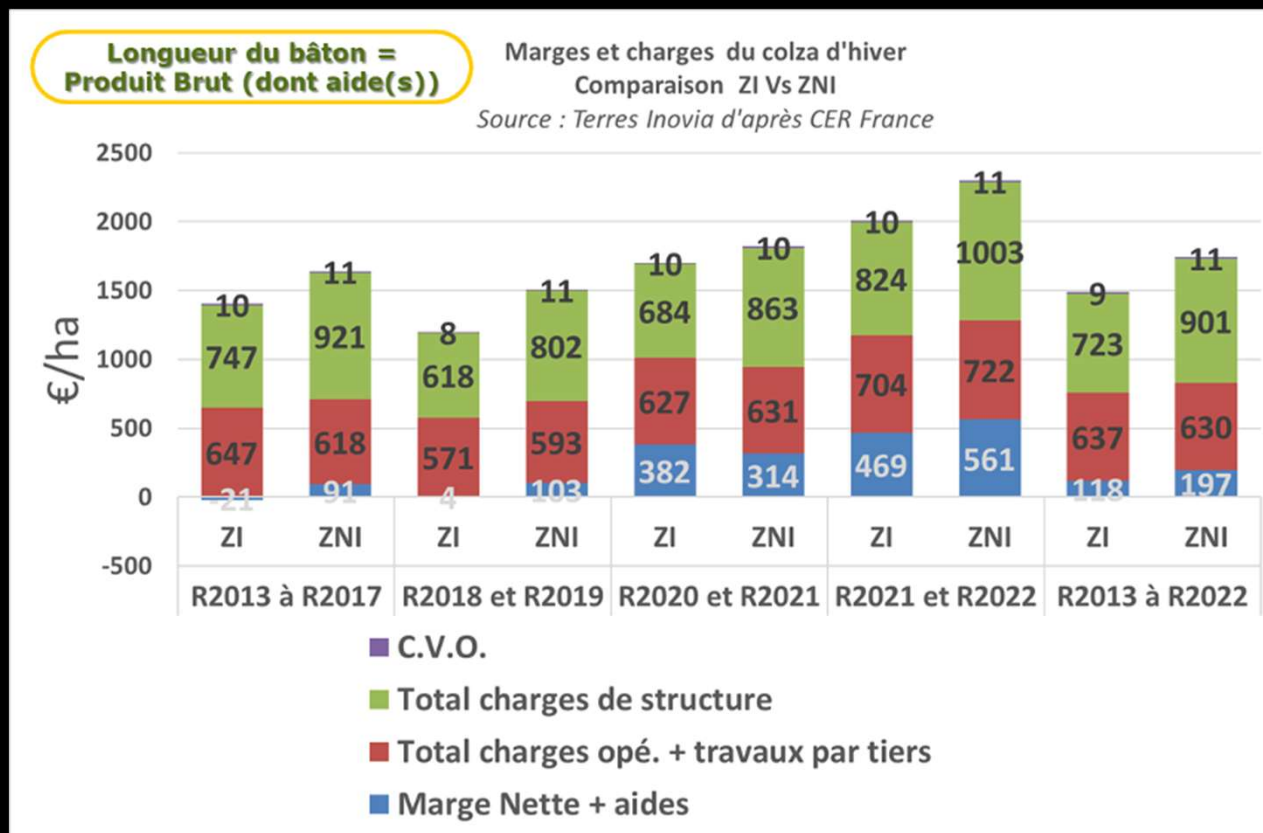


- Pour beaucoup de cultures la marge nette est très faible
- Exemple : Blé
- Marge nette = 1 T/ha = 10 to 20% du rendement

L'impact de la réduction des rendements sur les marges nettes dépend des prix de vente



Variations annuelles des marges nettes du colza en France



- Marges nettes très faibles : 100 à 200 €/ha
- Soit 7 à 12% du produit brut
- Toute baisse de rendement > 10% induit des marges brutes négatives
- Cela varie selon les années

Des rendements réduits ne sont pas acceptables pour les agriculteurs

- La plupart des cultures en France ne sont pas rentables avec des rendements réduits à 66% comme le prévoit la réglementation allemande en agrivoltaïsme
- Une analyse plus complète nécessite de prendre en compte la modification des coûts de structure induits par le projet agrivoltaïque sur l'exploitation (éviter les projets qui occupent plus de 25% de la SAU ?)

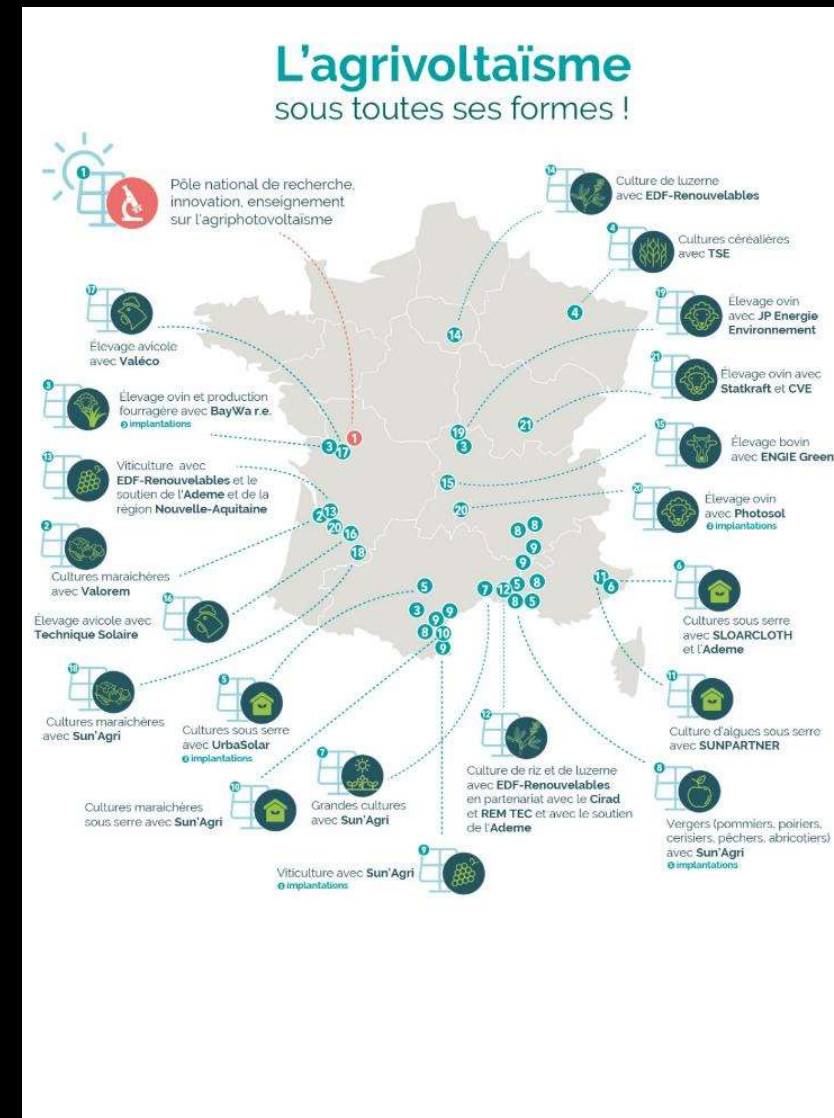
Stochasticité (et changement climatique)

- L'ombre affecte systématiquement la photosynthèse, morphogénèse, et floraison/fructification des plantes (compétition pour la lumière)
- Mais les cultures peuvent bénéficier de différents services produits par les panneaux
- Le bilan entre compétition (surtout lumière) et facilitation (par modification du microclimat) est la clef du succès des systèmes agrivoltaïques
- La compétition est obligatoire (pour la lumière), la facilitation est optionnelle, stochastique, aléatoire.
- Mauvaise nouvelle : l'évaluation agronomique ne peut être que probabiliste, il faut des données sur plusieurs années avec des climats variables
- Bonne nouvelle : les modèles numériques de cultures peuvent nous aider



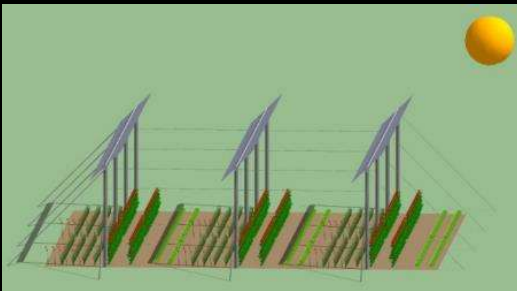
Recherches en agrivoltaïsme en France

- 15 années (depuis 2009)
- Innovation majeure : AV dynamique (Sun'Agri/INRAE)
- Etudes agronomiques (9 thèses)
- Nombreux partenaires industriels : Sun'R, Rem Tec, EDF Renouvelables, Photosol, Engie Green, Urbasolar, Baywa.re, SunPartner, SolarTub, Valorem, Valeco, Photosol, TSE, Next2Sun, etc...

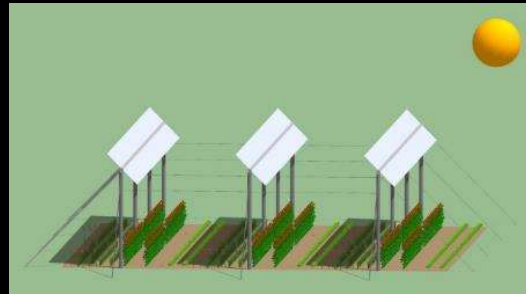


Agrivoltaïsme dynamique

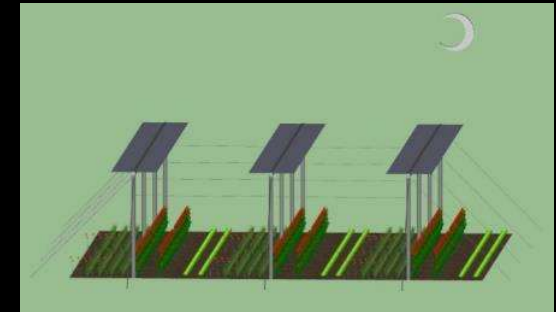
Cas 1 : La culture a besoin de beaucoup de lumière
(effacement = tracking inversé)



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



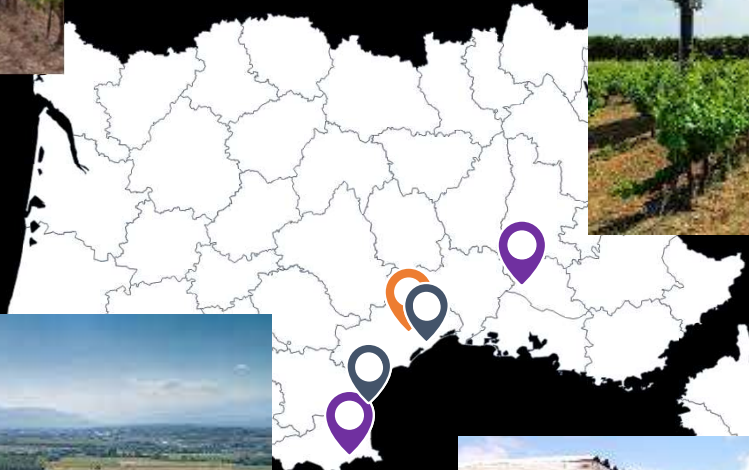
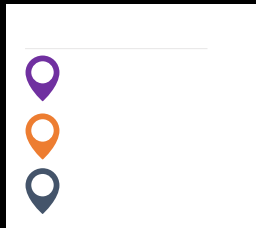
Les panneaux photovoltaïques mobiles pour s'adapter au changement climatique

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)



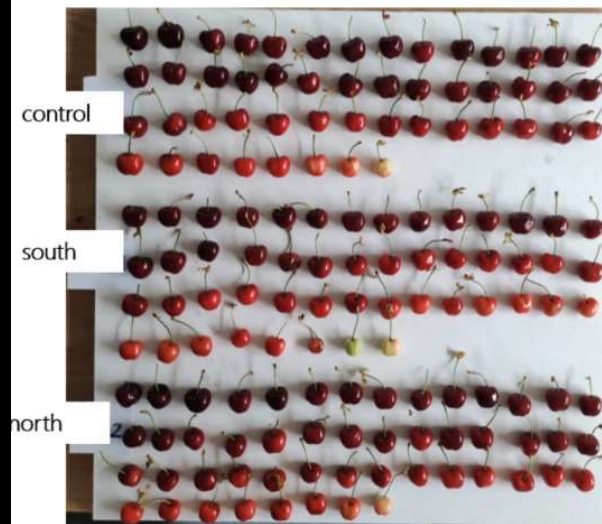
- Les vignes abritées résistent mieux aux canicules
- Besoin en eau réduit (de 12% à 34%)
- Profil aromatique amélioré :
 - +13% d'anthocyanes
 - + 9% à 14% d'acidité
- Degré d'alcool réduit et vendanges retardées
- Utilisation de la structure pour divers services à la vigne (irrigation, filets antigrêle, palissage)

Impact sur la qualité des produits

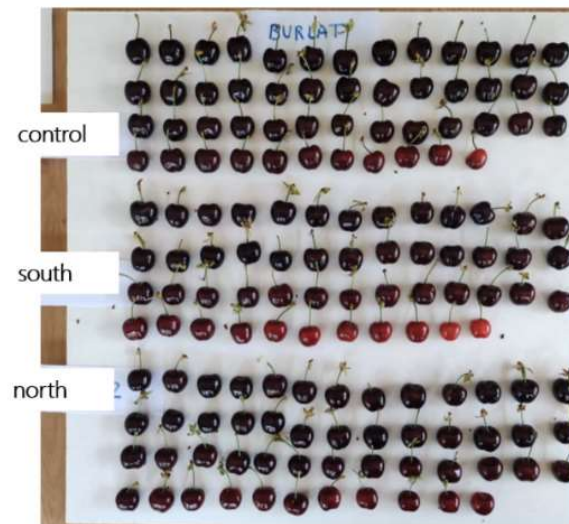
- Nombreuses études en cours sur arbres fruitiers, vigne
- Effets ténus, parfois positifs (degré alcoolique diminué en vigne), parfois négatifs (coloration fruits)
- Effets négatifs à faible impact sur valeur commerciale (mais très variable d'une espèce à l'autre)



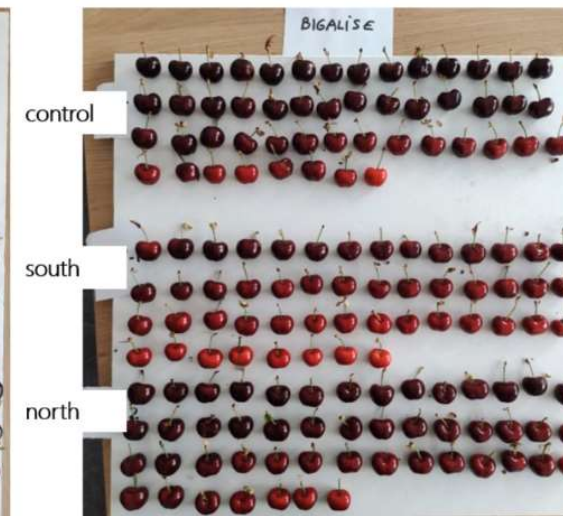
Primulat



Burlat



Bigalise



Impact écologique des centrales Agrivoltaïques

- 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	<ul style="list-style-type: none"> Richesse spécifique faible mais cohérente Repos sous ombrage
Odonates	2	<ul style="list-style-type: none"> Habitat peu favorable Individus en transit
Orthoptères	4	<ul style="list-style-type: none"> Habitat peu favorable Espèces thermophiles
Chiroptères	16	<ul style="list-style-type: none"> 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

 Origny M&C&S (external)

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
 - 2025 : Freiburg, Allemagne
 - 2026 : Inde
 - 2027 : France
 - 2028 : Chine
- Prochain congrès mondial : Allemagne en juillet 2025



Un foisonnement d'innovations

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

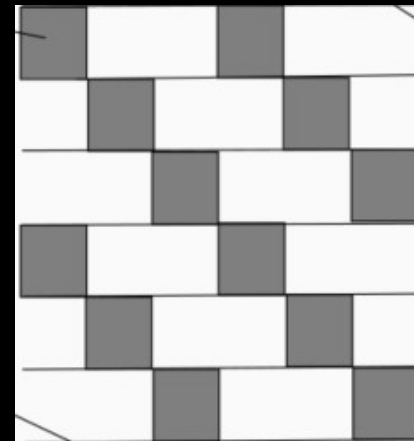


Chine

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

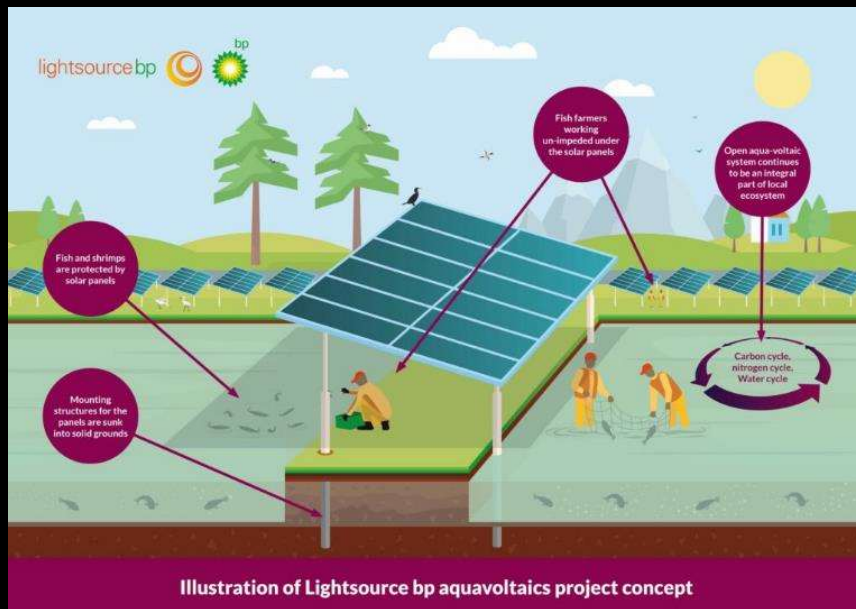


- Water saving (-30%)
- Higher biodiversity (desert area)



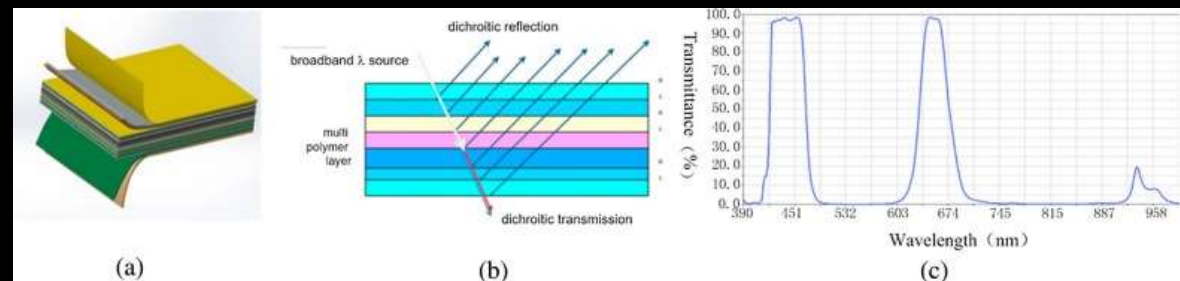
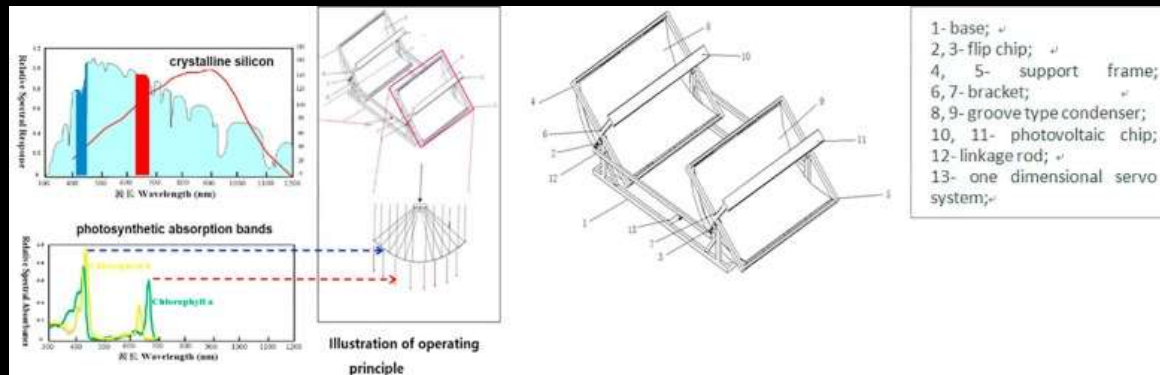
Taiwan

- 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 sont ceux

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 Agrivoltisme sur culture et sur élevage
- Peu utilisé (environ 50 projets labellisés)
- Peu d'exigences au-delà de la loi
- Pour éviter les faux projets



Conception

Construction

Exploitation

- Intérêt d'une norme? Les allemands et les italiens ont des normes, et pas de loi

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

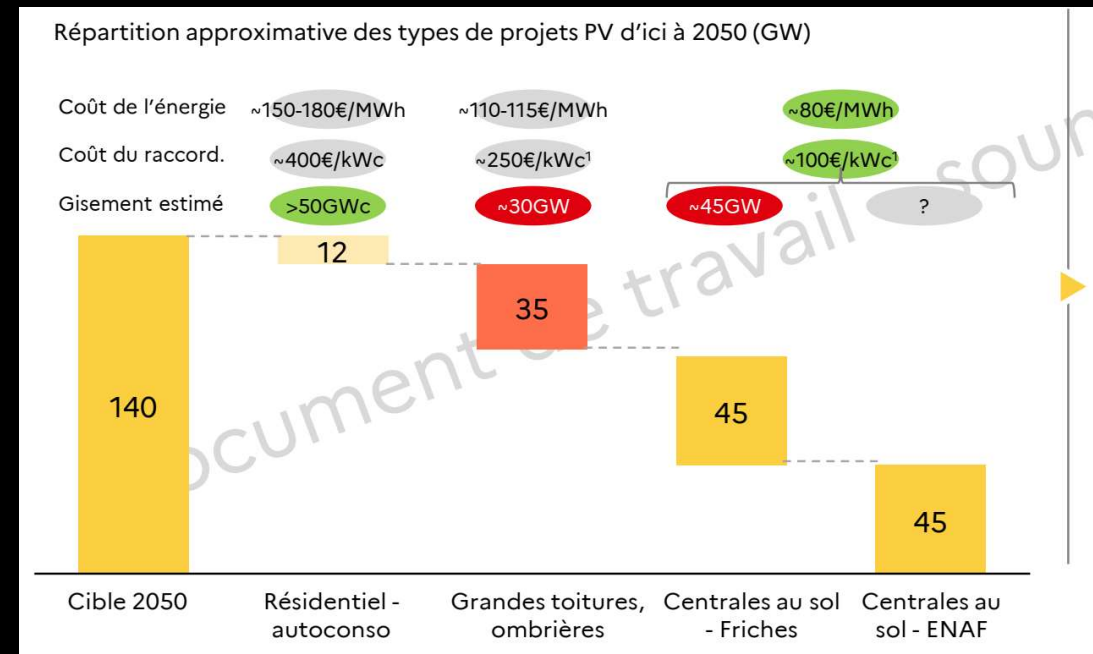
Ambition : 35 GWc d'ici 2028 pour 23 GWc disponibles sur ces gisements.

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

Dernières estimations SGPE 2024 : 140 GWc

Récemment réduit (mars 2025) sous influence de EDF par crainte de difficultés de régulation du réseau (75% de nucléaire non régulable)

Où trouver les surfaces supplémentaires ?



Ordres de grandeurs :

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

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

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

PV au sol : GCR (taux de couverture) = 50 à 60 %

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

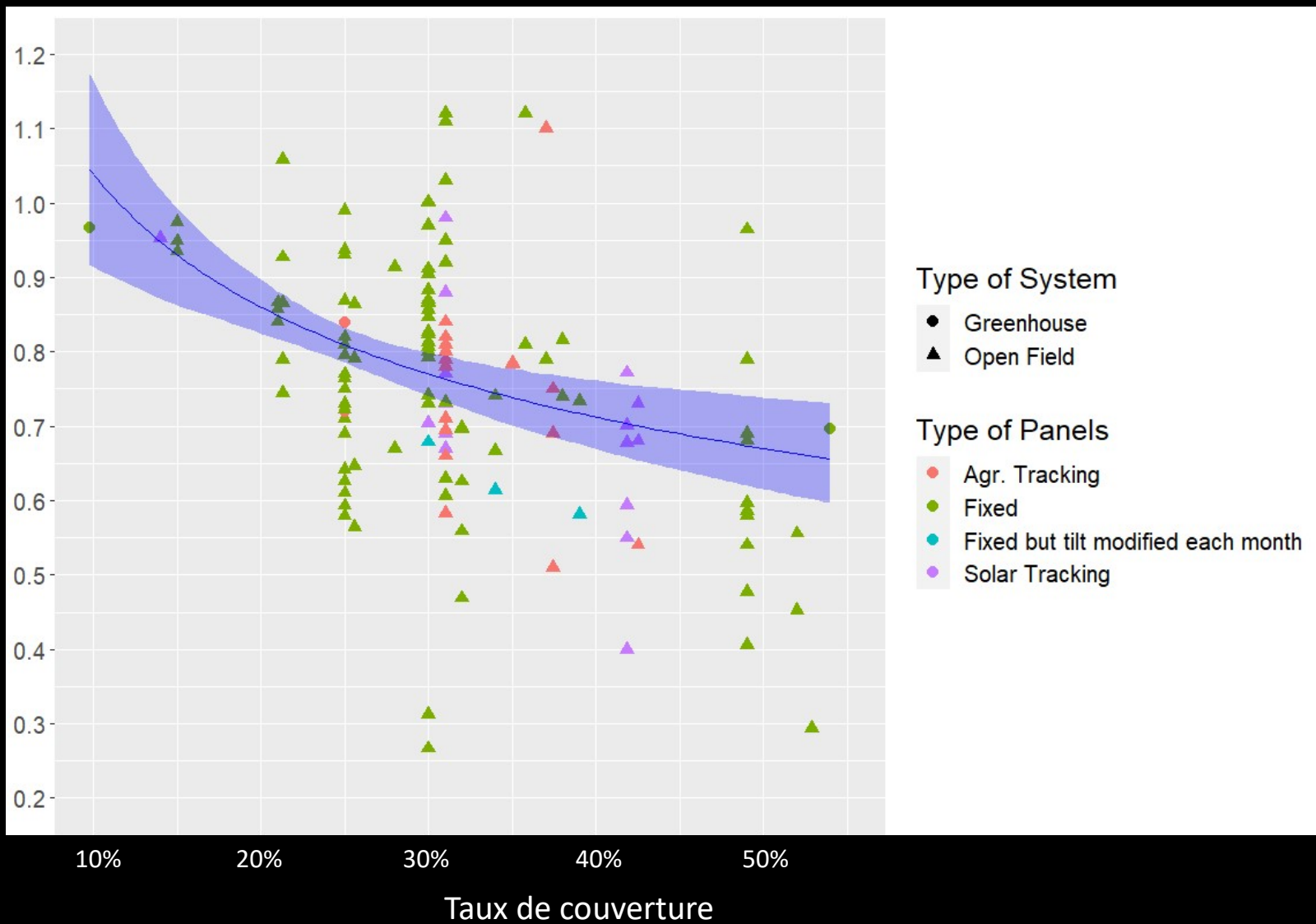


- 50% GCR = trop sombre pour la plupart des cultures

Panneaux semi-transparents et voile mobile réflecteur (Insolight)



Rendement
relatif
de la zone
cultivée



Japon : une réglementation qui demande l'impossible aux agriculteurs



Lizuka, Sosa, Chiba, Japan

Blé

Distance entre les rangées de poteaux : 4 m

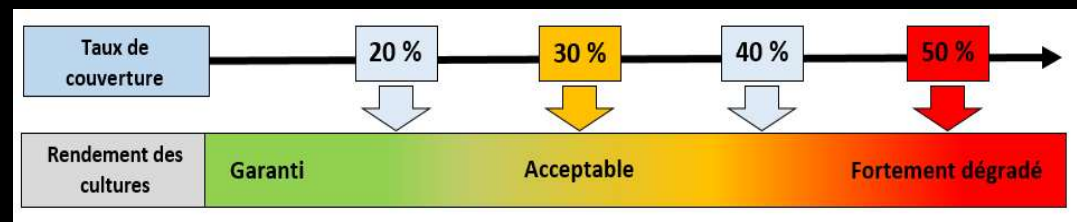
Surface cultivée : 75 %

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 > 100 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, frustrés, jaloux
- 85% du territoire métropolitain est à plus de 10 km d'un poste source RTE

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)

La situation française début 2025

- Peu de projets en exploitation (<200) et énormément en instruction (>1000)
- La France a probablement la réglementation la plus complète et complexe
- Acceptabilité sociale et partage de la valeur au cœur des débats
- Apparition de déontologies locales qui vont jouer un grand rôle

La loi française demande aux agriculteurs de faire des miracles

Rendements agricoles exigés

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



Loi APER (Accélération des énergies renouvelables) - 10 mars 2023

Décret d'application 2024-318 - 8 Avril 2024

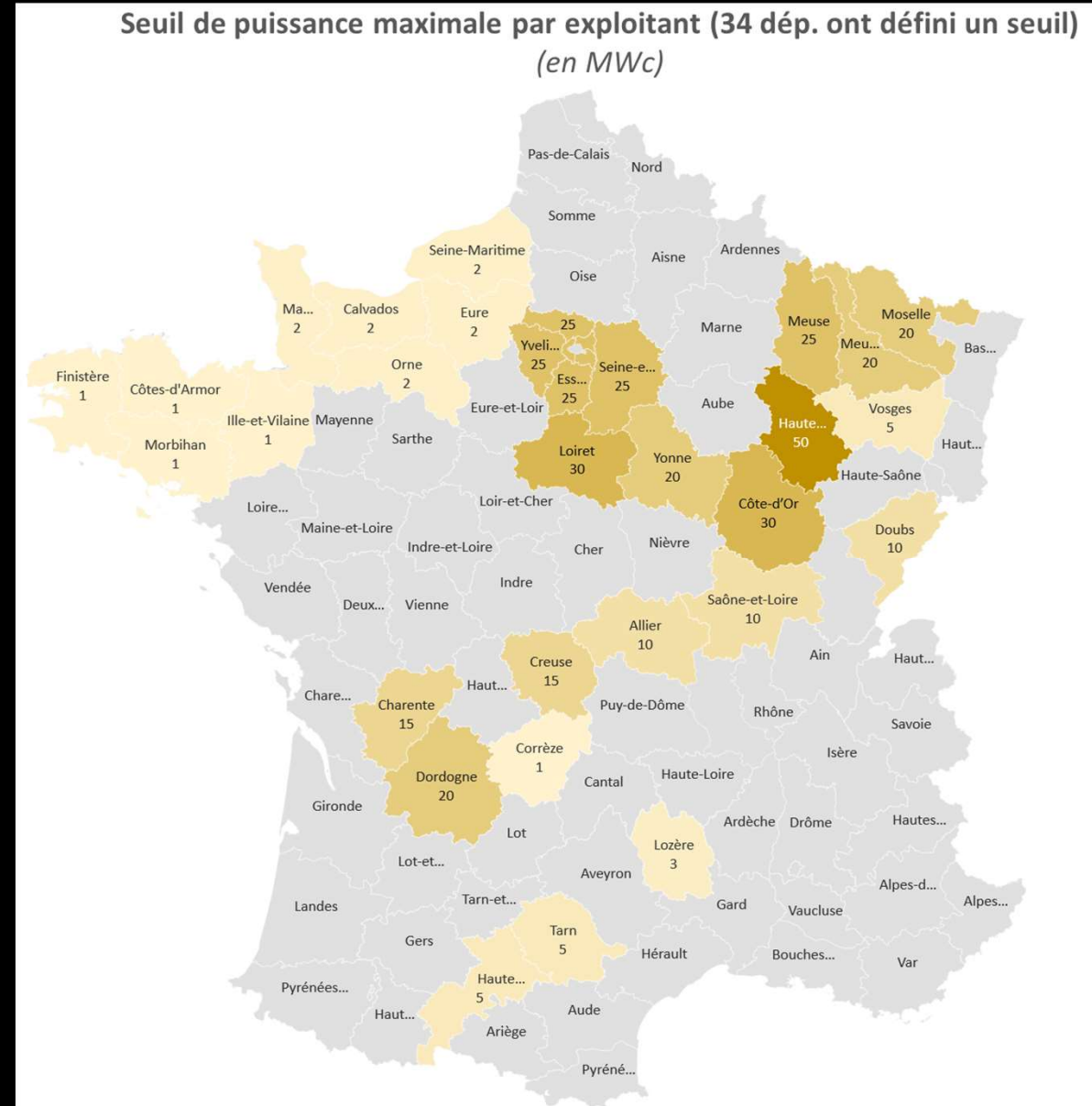
Arrêté ECOR2404313A – 7 juillet 2024

- PV au sol interdit sur terres agricoles
- Agrivoltaïsme autorisé sur terres agricoles et définit comme un outil au service de la production agricole. Rendement relatif exigé : 90%
- PV au sol (« compatible ») autorisé sur terres incultes (depuis au moins 10 ans), friches, forêts, espaces naturels repérés dans une cartographie élaborée par les chambres d'agriculture et approuvée par le préfet.
- La CDPENAF a un pouvoir de vie ou de mort sur les projets Agrivoltaïques. Emergence de déontologies locales.
- Contrôles et sanctions a posteriori prévus pour éviter les projets alibis.

Règles locales

Puissance maximale autorisée par projet (en MWc)

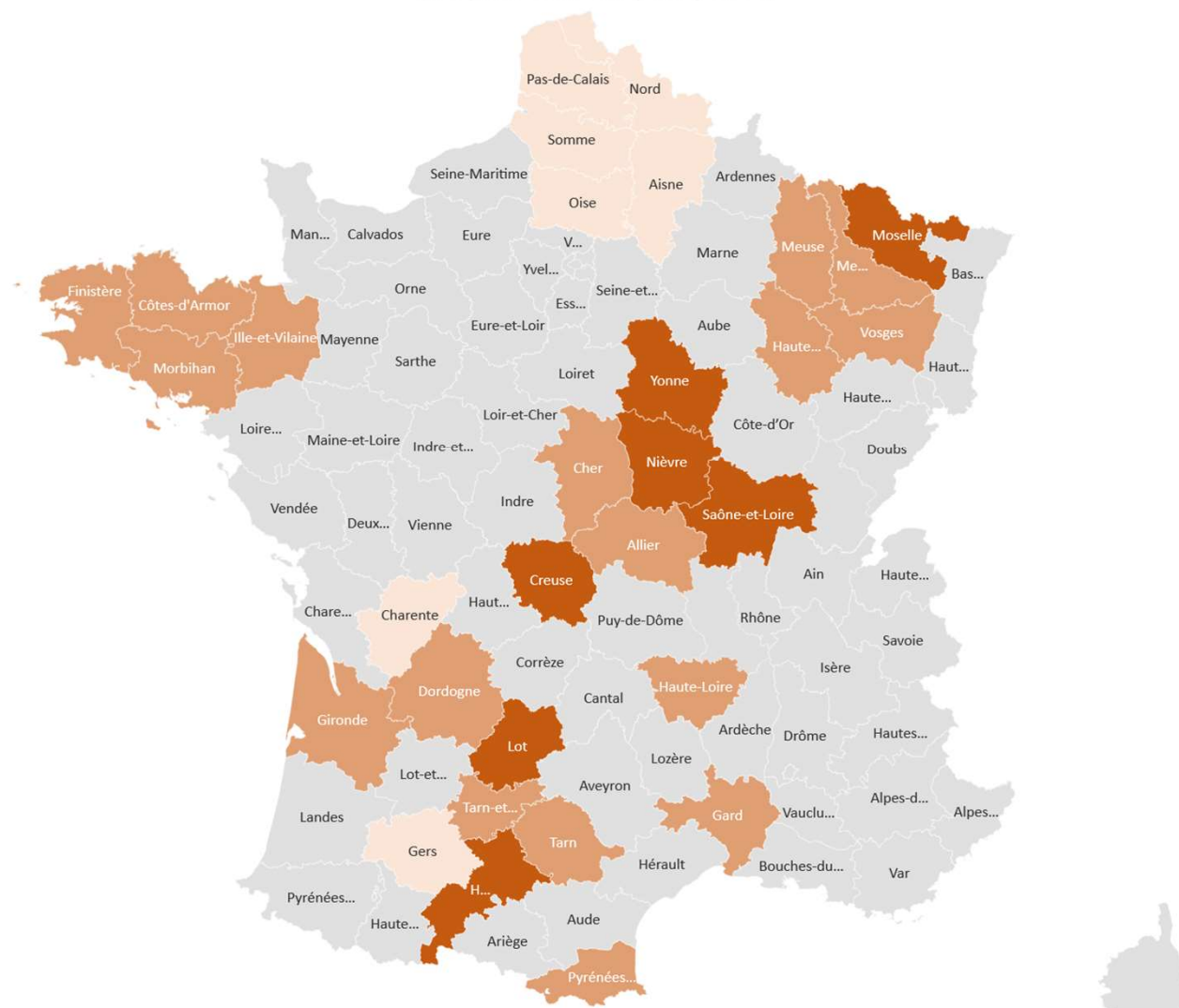
1 to 50



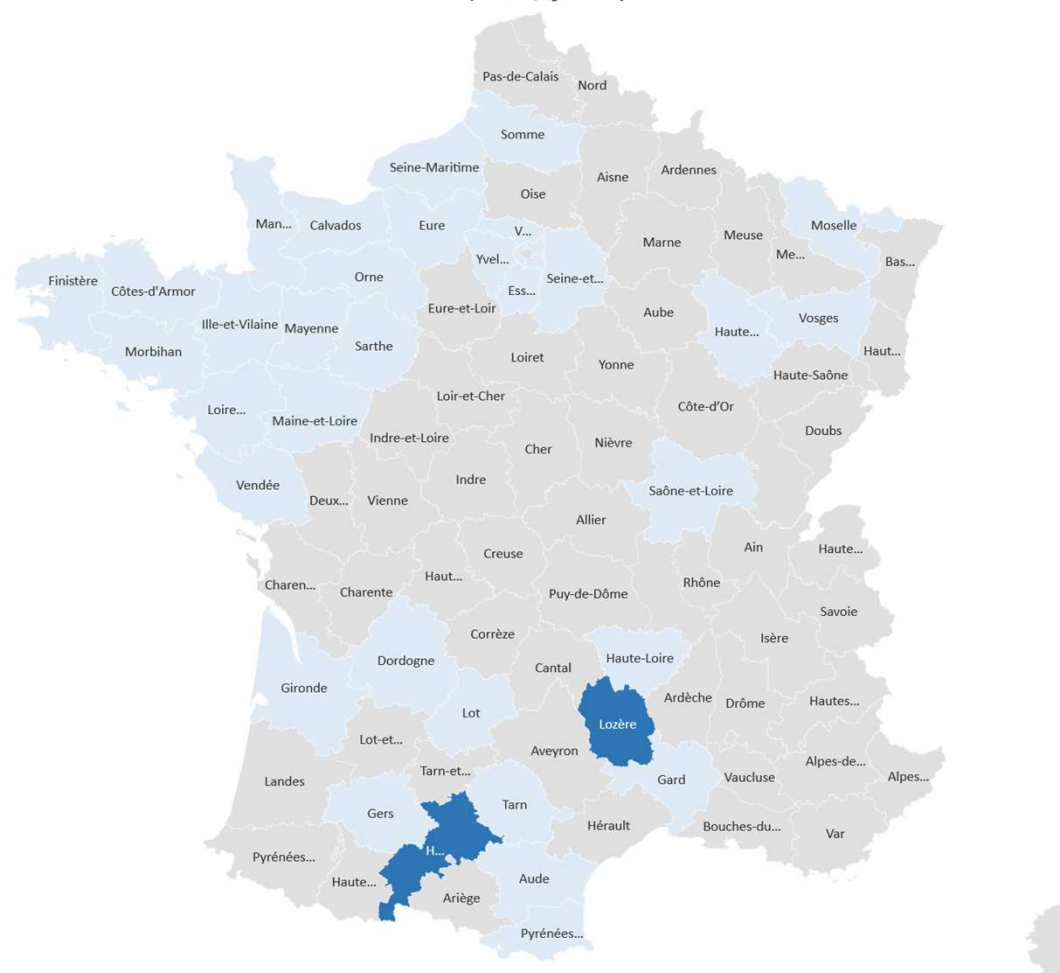
Partager la valeur ?

- Obligatoire dans 7 départements
- Recommandé dans 17 départements
- 1500 €/ha/an en moyenne

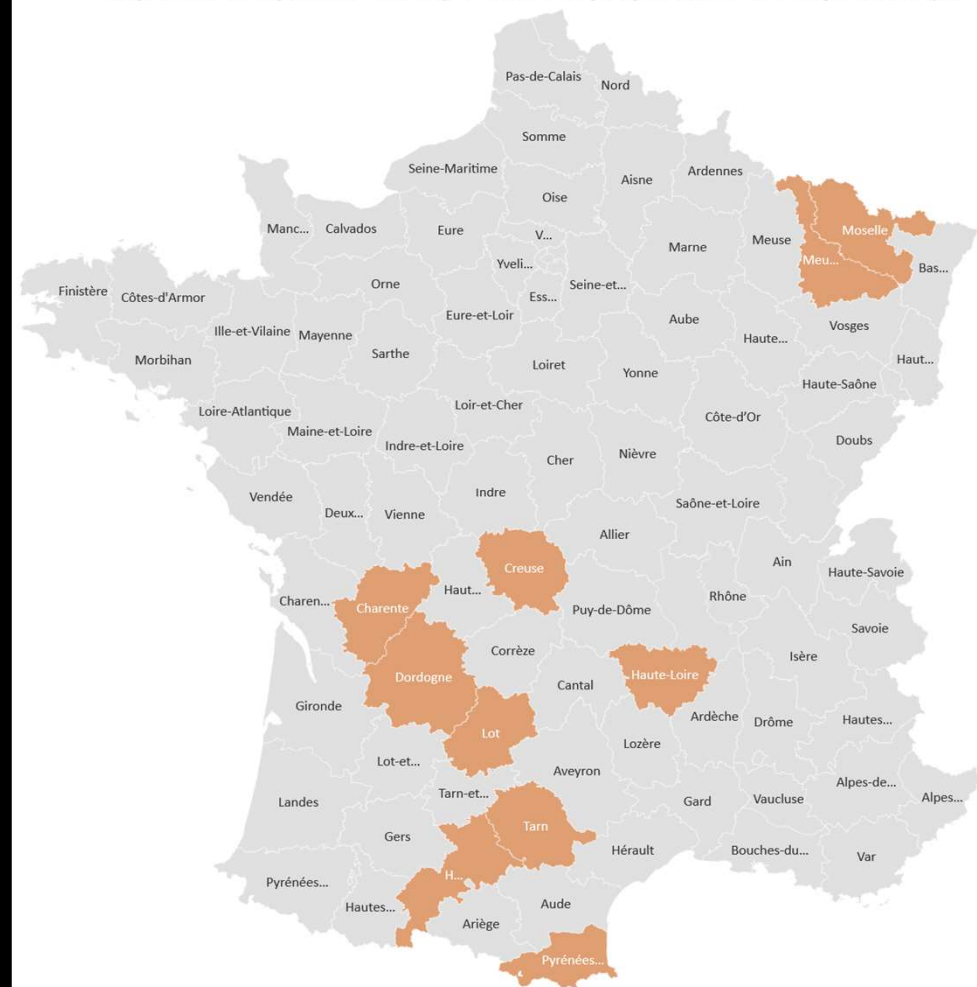
Fonds de partage territorial de la valeur : "En réflexion" (7 dép.) / "Incitation" (17 dép.) /
"Obligation" (7 dép.)
(du plus clair au plus foncé)



Entrée au capital des agriculteurs : "Incitation" (35 dép.) / "Obligation" (2 dép.)
(clair / foncé)



Répartition équitable du loyer entre le propriétaire et l'exploitant (10 dép.)



Un décret d'application... inapplicable?

- A choisi un contrôle a posteriori du rendement agricole (mesures difficiles et non fiables)
- Permet des taux de couverture élevés mais exige des baisses de rendement très limitées
- Utilise un taux de couverture en projection absurde (inapplicable aux installations verticales ou mobiles)

La proposition de loi Lecamp / Potier

- Propose un seuil maximal de puissance de 5 MWc par exploitant
- Propose un droit de préemption des collectivités territoriales pour le foncier agricole proche des postes RTE (avec installation/location obligatoire d'agriculteurs)
- Ne propose rien pour faciliter la vie des petits projets
- Inscrite en dernière position à l'ordre du jour de la session transpartisane des 1 et 2 avril prochain

Contexte

Remise en cause des ENR (et surtout le PV) par la filière nucléaire

Les prix négatifs de l'électricité souvent évoqués restent anecdotiques (en coût pour la collectivité)

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

Contact : christian.dupraz@inrae.fr