

Agrivoltaïsme

Mieux utiliser la lumière du soleil

Enjeux, Potentiel, Contraintes agronomiques

4 juin 2025



Christian Dupraz,

Académie d'Agriculture de France, Section 2
INRAe, UMR Absys, Université de Montpellier, France



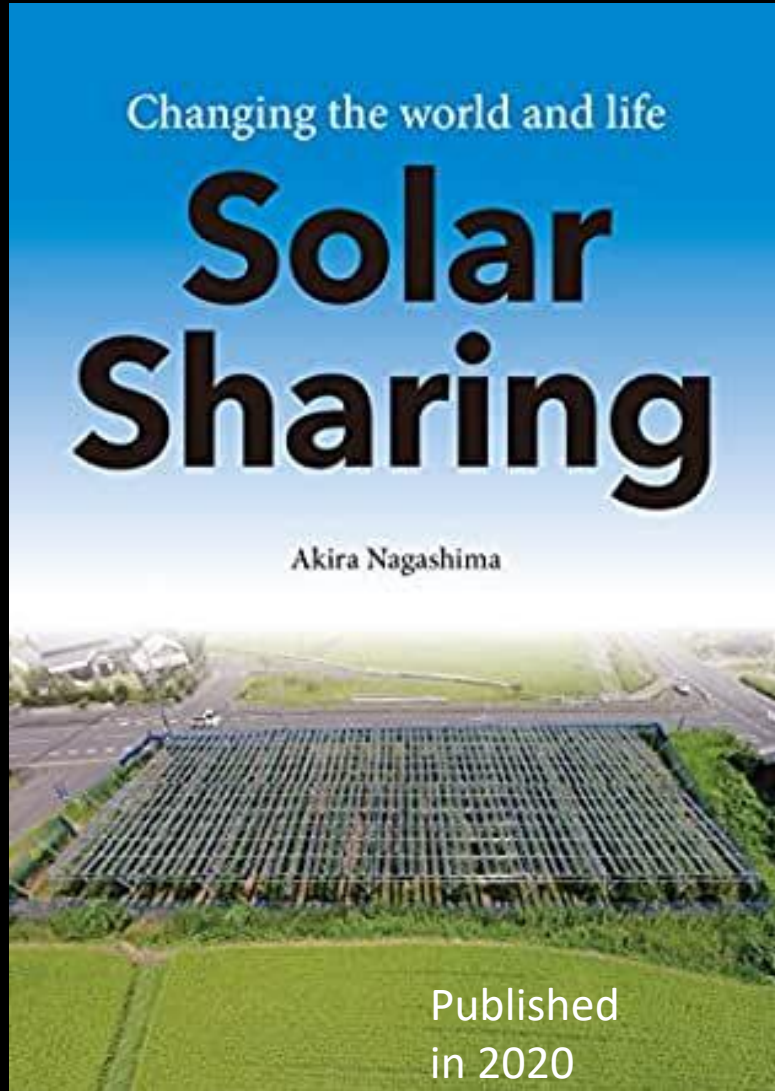








Japon





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?
 - -> 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	] Production agricole alimentaire maintenue
• 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	
• 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

Podewils, C., *Organized wastefulness. PHOTON International 2007 (04): p. 106-113.*

Benoit, M. and W. Schäfer. 2007 *Which energy vectors for requirements in mechanical energy? Bio-fuels or photovoltaic energy? Territory and social consequences. in Farming Systems Design Conference proceedings, p37-38. 2007. Catania, Sicily, Italy.*

Arbres et Cultures



Agroforesterie

Panneaux PV et cultures

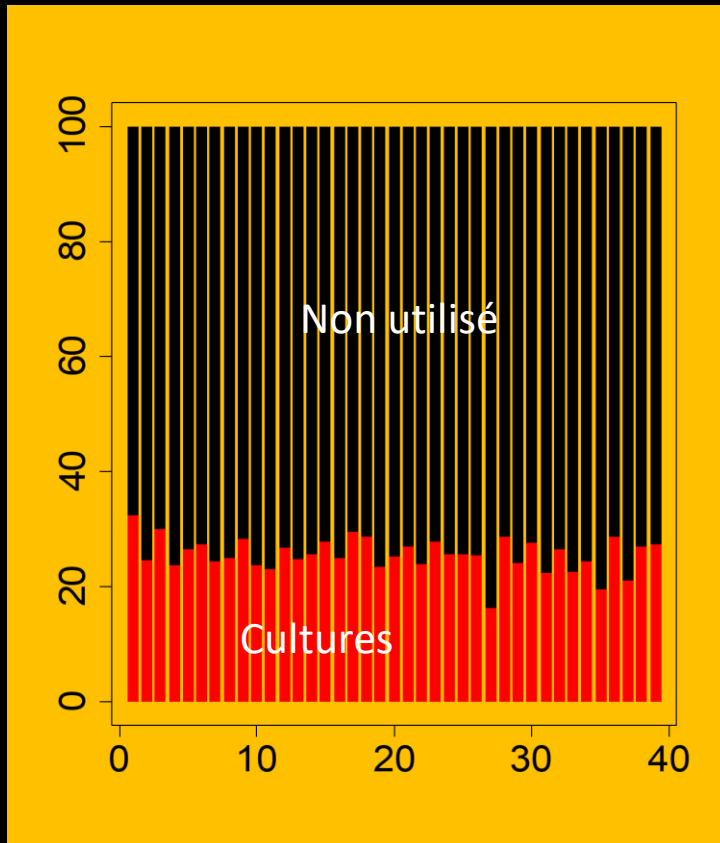


AgriVoltaïsme

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

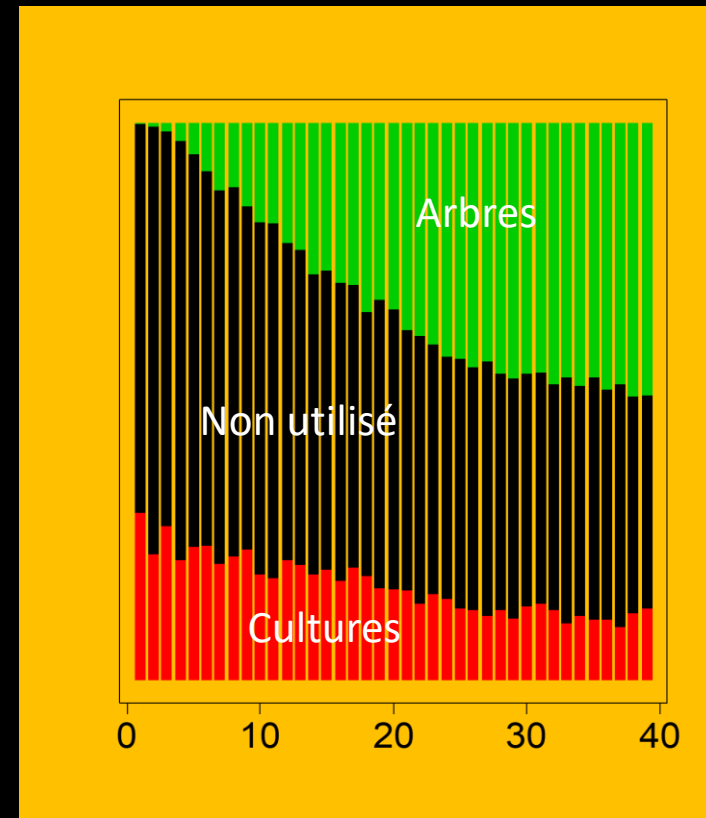
Agriculture

% du rayonnement
incident intercepté



Années

Agroforesterie



Années

INRAE-Sun'R

Premier prototype mondial (Montpellier, 2010)



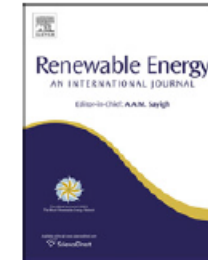




Contents lists available at ScienceDirect

Renewable Energy

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



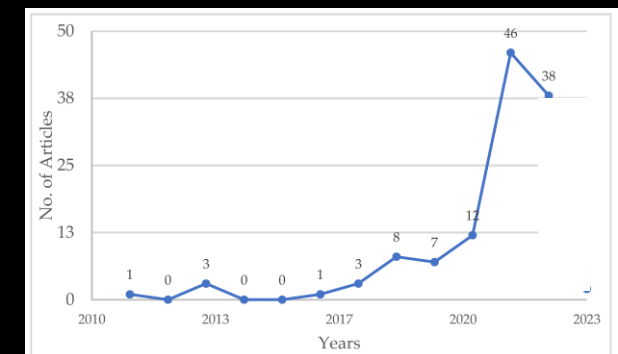
Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes

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

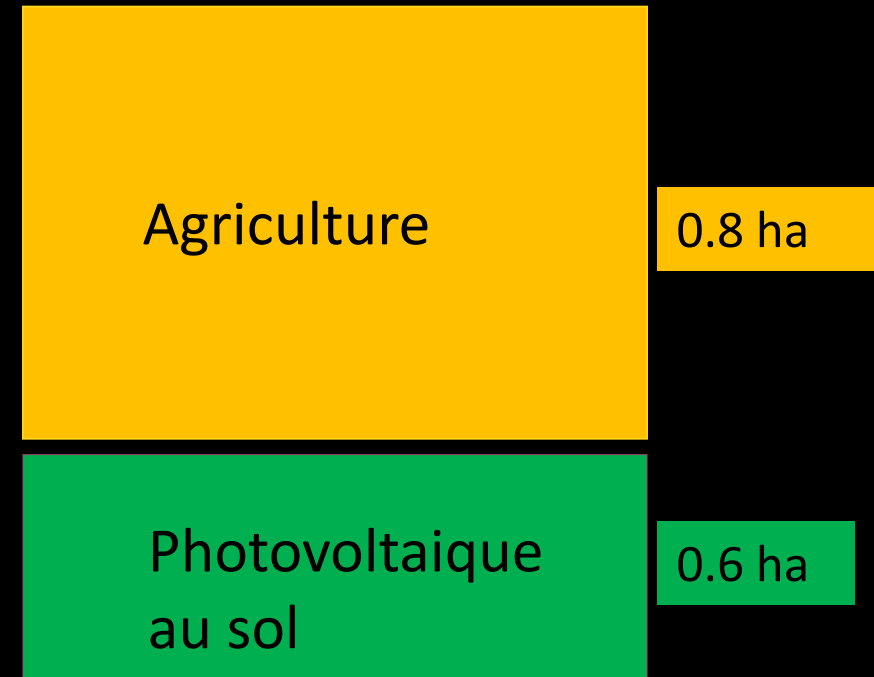


Mélange (Intrication)



1 ha

Assolement (séparation)

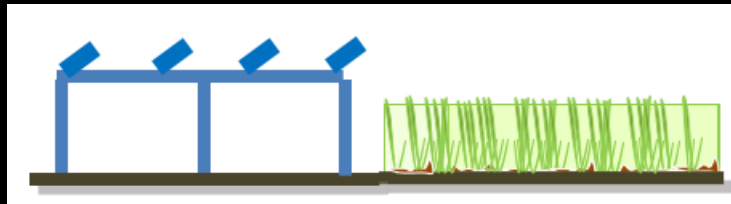


LER = 1.4 ha

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

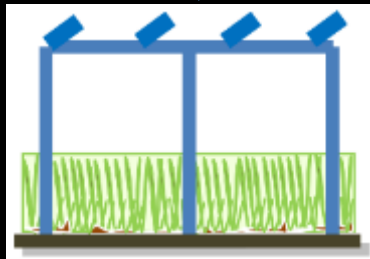
Quel LER en Agrivoltaïsme?

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



1 ha

1 ha



1 ha

Maximum LER = 2

Quel LER en Agrivoltaïsme?

- 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 agrivoltaique

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

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 comportement des cultures à l'ombre?
- Les performances des cultures sous ombrières filets ou en agroforesterie peuvent-ils être extrapolés à l'agrivoltaïsme?

Ombre : évitement ou tolérance?

(a)

Responses	Shade-avoidance			Shade-tolerance		
	W or control	Proximity shade	Canopy or deep shade	W or control	Proximity shade	Canopy or deep shade
Elongation		Strongly promoted	Promoted		Slightly or no promoted	
Defense		Reduced			Strong	
Overall performance • in high light • in low light	Good	Poor		Stress	Good	
Photosynthetic performance		High light compensation point			Low light	
Growth and resource use strategy	Rapid High organ replacement, early DIS			Slow Conservative – slow organ replacement, delayed DIS		

L'évitement de l'ombre est suicidaire en agrivoltasme

On privilégie donc la sélection de variétés tolérantes à l'ombre

Tolérance et adaptation à l'ombre

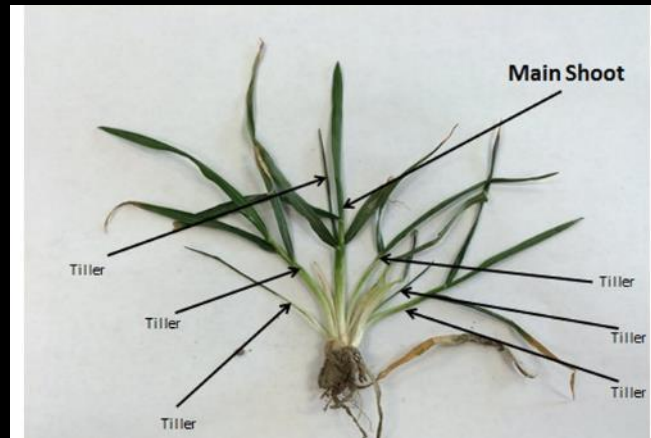
- Feuilles d'ombre et de lumière
- Les filets d'ombrage font une ombre homogène
- Ne pas extrapoler les experimentations avec filets d'ombrage à l'agrivoltaïsme
 - L'adaptation à l'ombre est difficile sous les systems agrivoltaïques
 - Les plantes subissent le plein soleil de manière intermittente

Impacts de l'ombre sur les processus végétatifs et reproducteurs

- Baisse inéluctable de la photosynthèse nette
 - Effet très différent sur les cultures récoltées au stade végétatif ou reproducteur
 - La biologie florale peut être très sensible à l'ombre ou au déficit de Carbone
 - Certains stades phénologiques sont très sensibles aux stress abiotiques (chaleur, sécheresse...) et les panneaux peuvent contribuer à les protéger. Impact majeur sur vigne, arbres fruitiers.
-
- La photosynthèse est réduite proportionnellement à l'ombrage
 - La morphogénèse dépend des sommes de températures d'organes : l'ombre ralentit la morphogénèse.

Exemple du tallage des céréales

- Le tallage est une étape clef du rendement des céréales (1 graine = 3-6 talles = 3-6 épis)
- Le tallage se passe en hiver quand le soleil est très bas et faible
- Le tallage nécessite de l'énergie et du carbone
- Le tallage est très problématique sous les systèmes agrivoltaïques



L'ombre étrange des systèmes agrivoltaïques

- Alternances de plein soleil et d'ombre portée
- Les plantes subissent ces transitions brutales
- Le nombre de transitions par jour depend de la structure de l'installation
- La transition ombre -> soleil est la plus délicate



L'adaptation des feuilles à l'ombre est-elle un avantage en agrivoltaïsme?

- Feuilles d'ombre = feuilles fines et grandes, avec un taux de photosynthèse surfacique réduit
- Ces feuilles ne sont pas efficaces pendant les moments de plein soleil
- Conclusion contre-intuitive : bien éclairer les plantes pendant la formation des feuilles
- La durée du cycle des cultures impacte beaucoup (2 mois pour radis, 12 mois pour pâtures)
- Ref : Juillion, P., et al. Specific Leaf Area and Photosynthesis of Apple Trees Under a Dynamic Agrivoltaic System in Agrivoltaics2023. 2023. Daegu, South Korea.



La floraison des arbres fruitiers

- Les bourgeons à fleurs sont souvent formés l'année précédente
- Les fleurs nécessitent beaucoup de réserves carbonées
- Souvent, il y a trop de fleurs et de fruits, ce qui impose d'éclaircir les fruits
- Grâce à l'ombre, pourrait-on éviter ce travail d'éclaircissage des fruits?
- Mais le manque de C conduit à des petits calibres



Améliorer l'homogénéité de l'ombre?

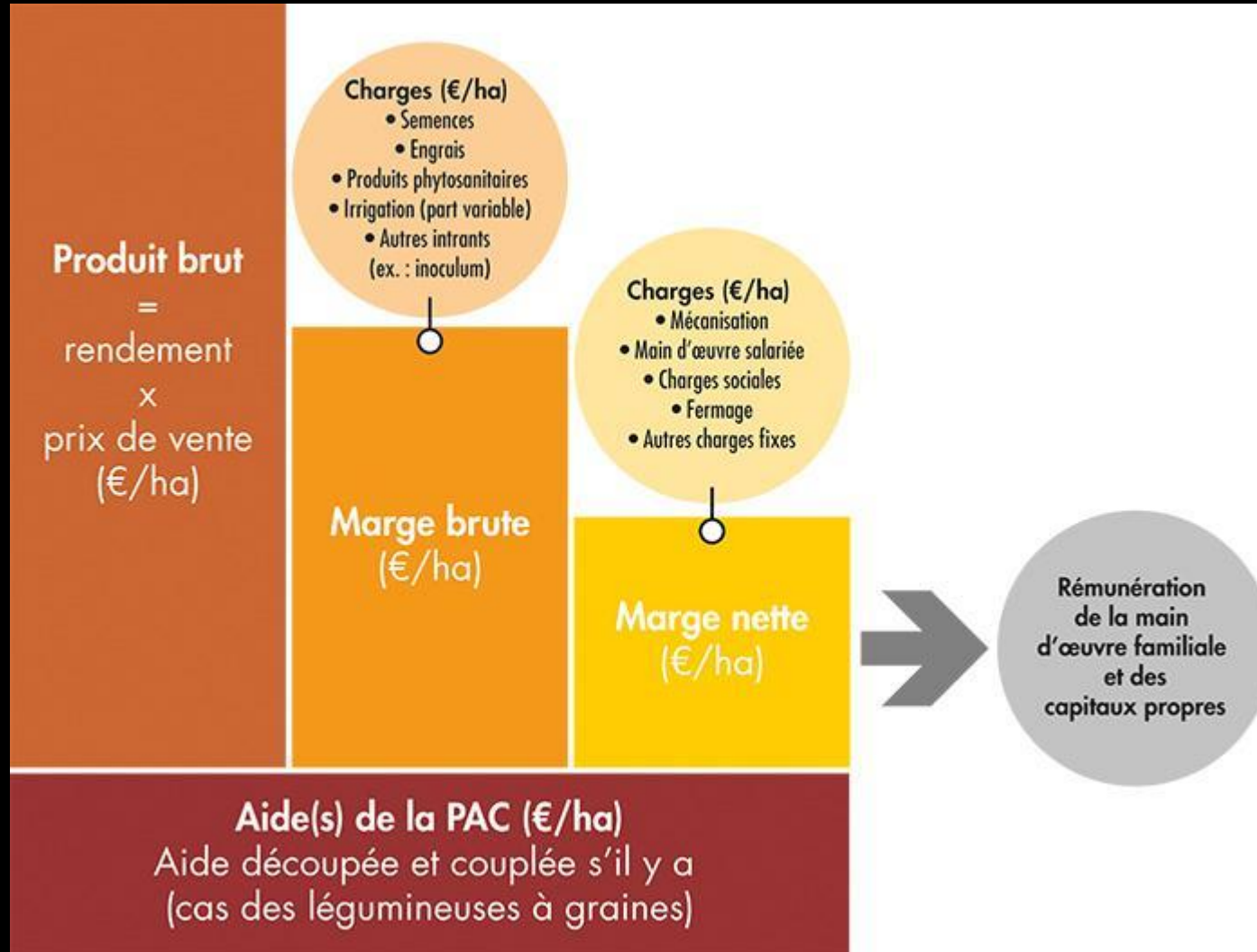
- Panneaux fixes non alignés sur le sud (Heggelbach)
 - Améliore l'homogénéité du rayonnement reçu par les cultures sous le système.
 - Mais réduit la production électrique
 - Rejeté par les électriciens
- Systèmes semi-transparents
- Dispositions en quinconce, en damier



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

Des rendements réduits ne sont pas acceptables pour les agriculteurs

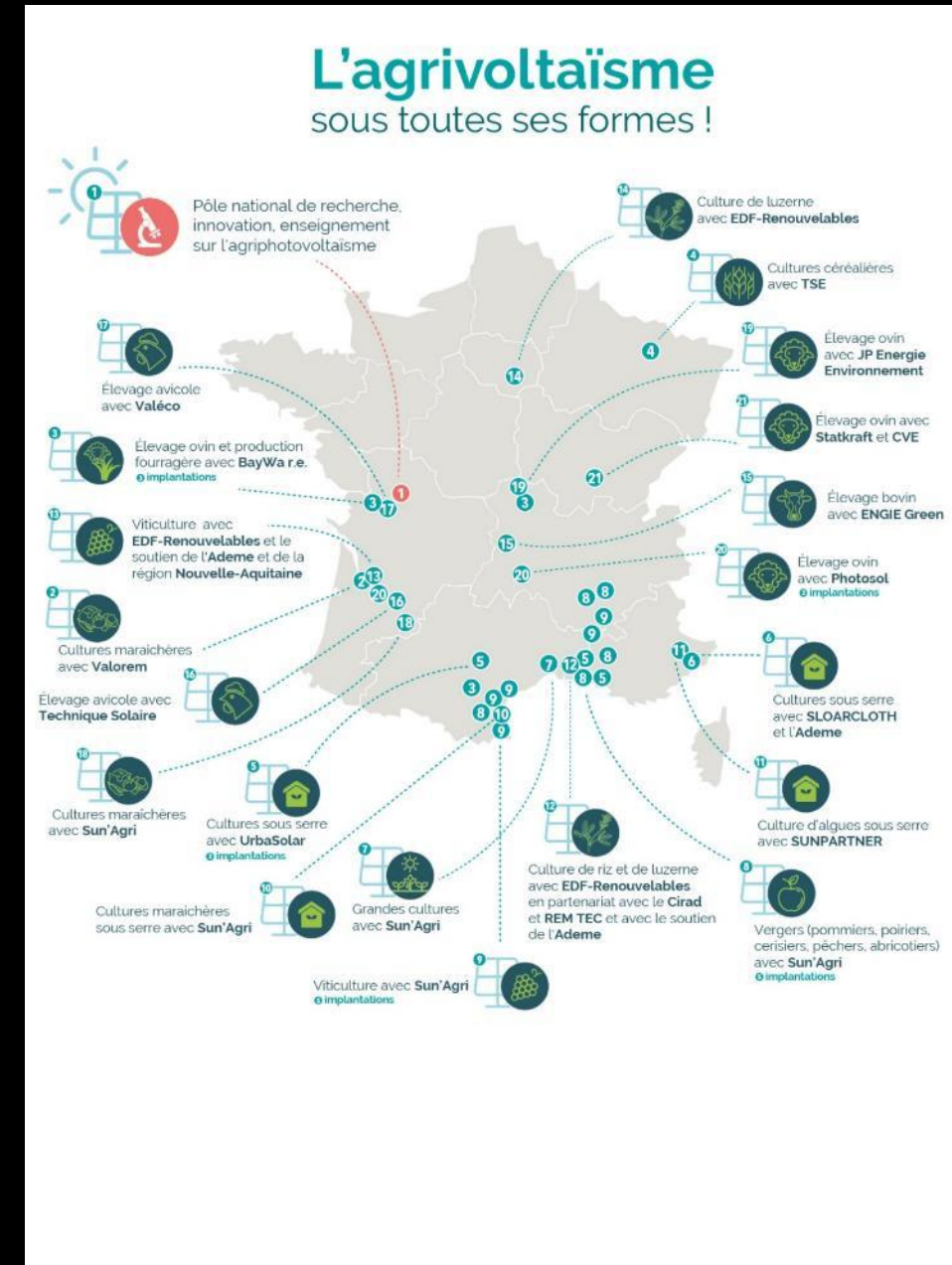
- La plupart des cultures en France ne sont pas rentables avec des rendements réduits à 66% comme le prévoit la réglementation allemande en agrivoltaïsme
- Une analyse plus complète nécessite de prendre en compte la modification des coûts de structure induits par le projet agrivoltaïque sur l'exploitation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

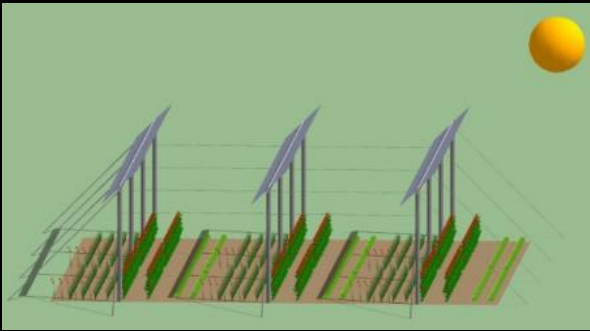
Recherches en agrivoltaïsme en France

- 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...

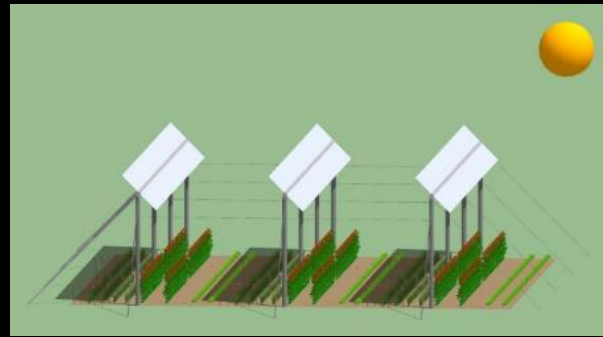


Agrivoltaïsme dynamique

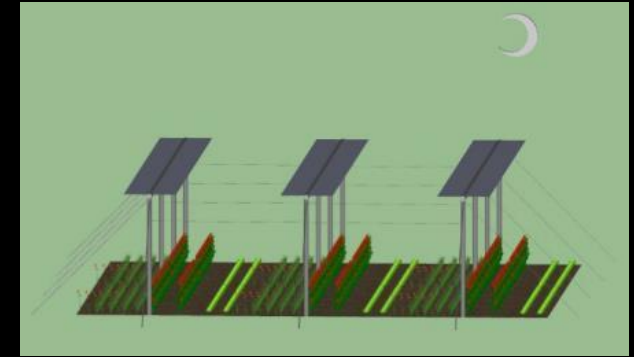
Cas 1 : La culture a besoin de beaucoup de lumière
(effacement = tracking inversé)



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



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



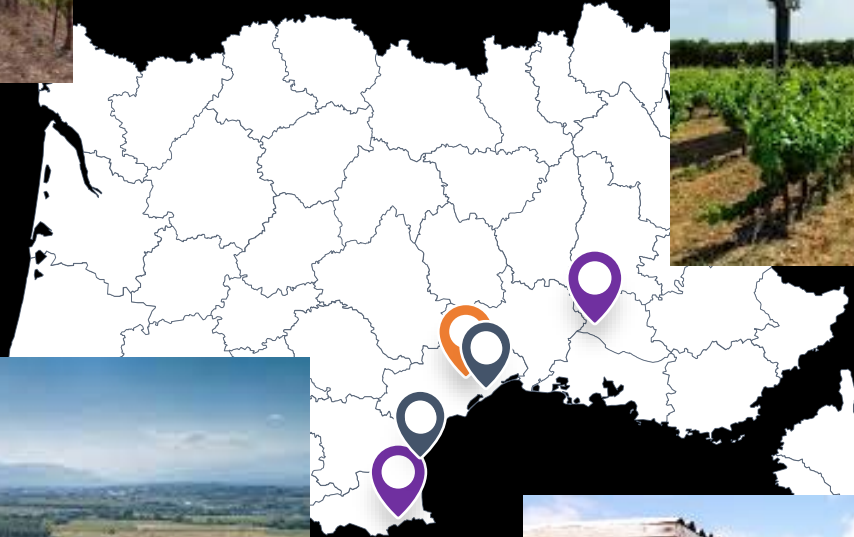
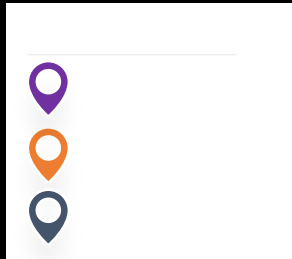
Les panneaux photovoltaïques mobiles pour s'adapter au changement climatique

Production électrique réduite de 30% en tracking inversé.



Experimentations viticoles

Sun'Agri R&D program



Agrivoltaïsme viticole



Piolenc (84)



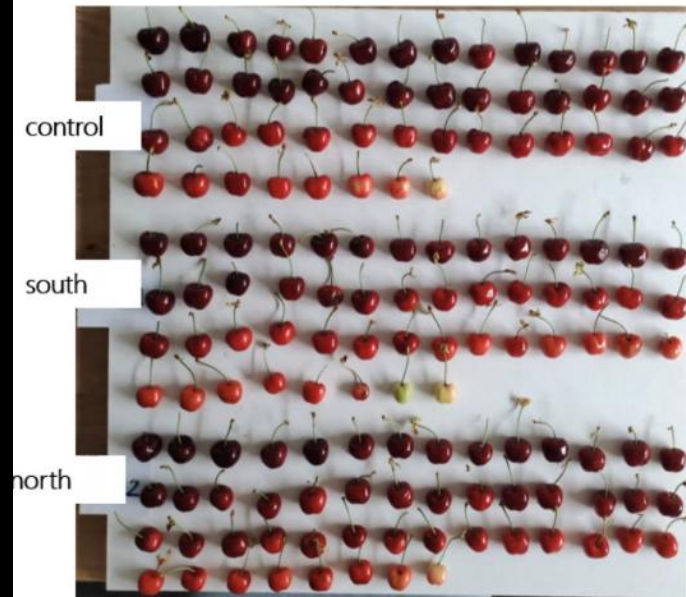
- Les vignes abritées résistent mieux aux canicules
- Besoin en eau réduit (de 12% à 34%)
- Profil aromatique amélioré :
 - +13% d'anthocyanes
 - + 9% à 14% d'acidité
- Degré d'alcool réduit et vendanges retardées
- Utilisation de la structure pour divers services à la vigne (irrigation, filets antigrêle,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

Impact sur la qualité des produits

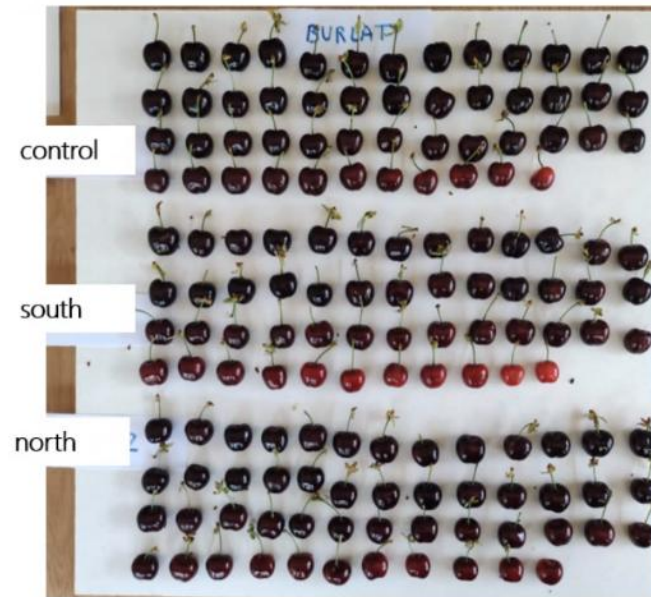
- Nombreuses études en cours sur arbres fruitiers, vigne
- Effets ténus, parfois positifs (degré alcoolique diminué en vigne), parfois négatifs (coloration fruits)
- Effets négatifs à faible impact sur valeur commerciale (mais très variable d'une espèce à l'autre)



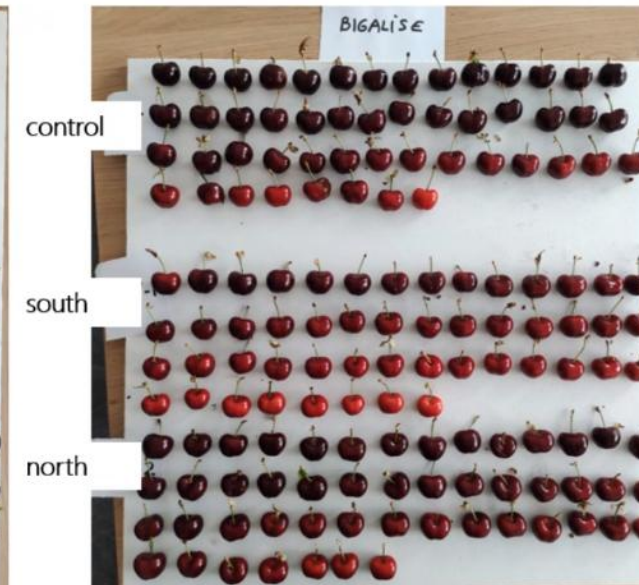
Primulat



Burlat



Bigalise



Impact écologique des centrales 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



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
- Assymetrical glasshouses designs
- Tubular Photovoltaic systems
- Organic Photovoltaic systems
- Et bien d'autres ...

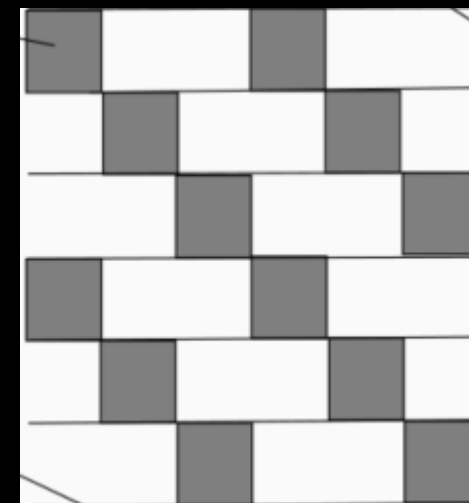


Chine

- 1 GW avec baies de goji
- Ningxia Province (Huawei)
- Smart PV (trackers)



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



Ordres de grandeurs :

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

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

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

2024 : 600 GWc installés sur la planète (équivalent de 120 réacteurs nucléaires)

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

Le dilemme du taux de couverture

- $\text{GCR} = \text{surface de panneaux} / \text{surface au sol}$
- 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



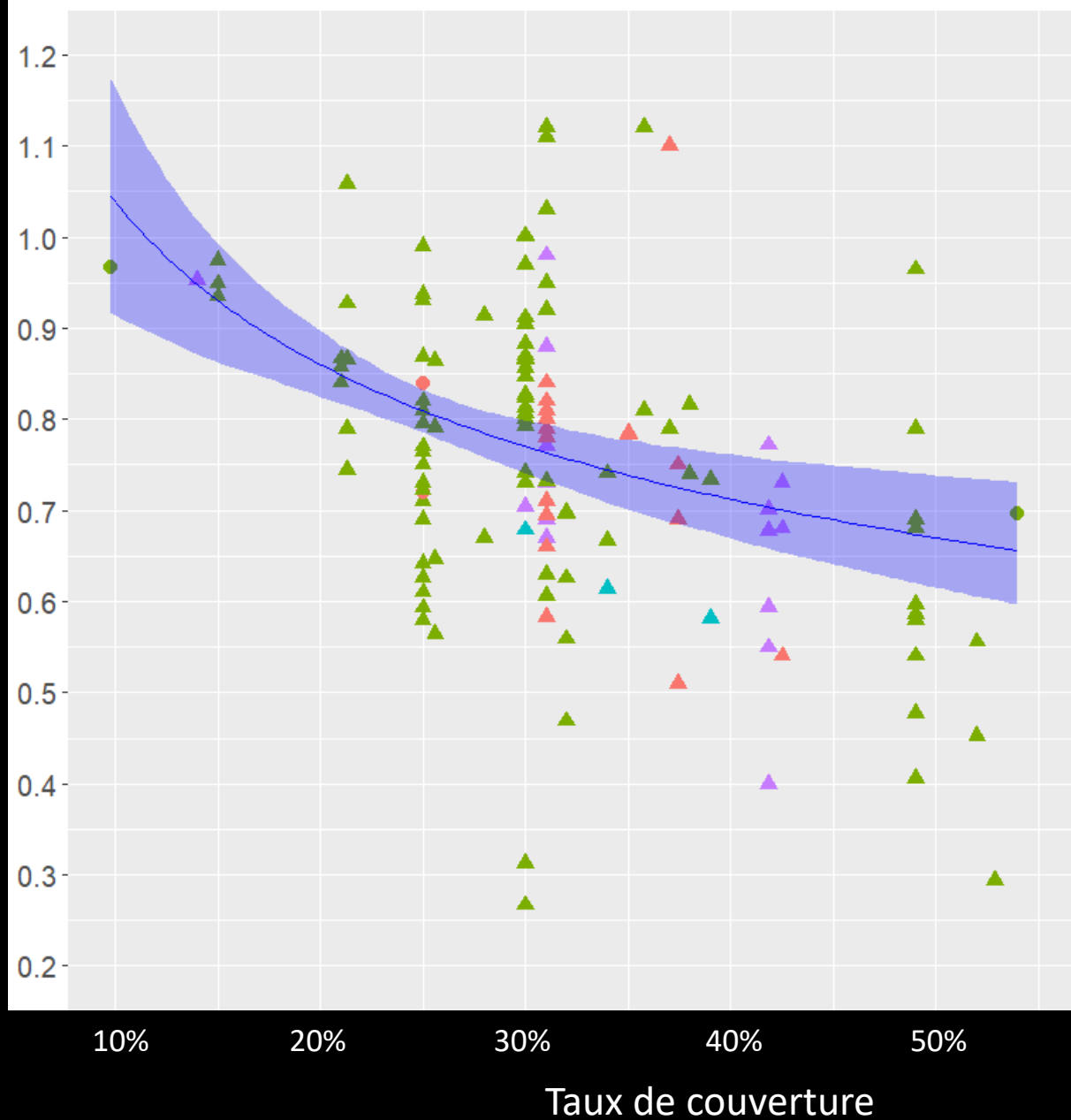
Le précédent fâcheux des serres photovoltaïques



- 50 à 60 % GCR = trop sombre pour la plupart des cultures

Panneaux semi-transparents et voile mobile réflecteur (Insolight)





Type of System

- Greenhouse
- ▲ Open Field

Type of Panels

- Agr. Tracking
- Fixed
- Fixed but tilt modified each month
- Solar Tracking

Taux de couverture

Japon : une réglementation qui demande l'impossible aux agriculteurs



Lizuka, Sosa, Chiba, Japan

Blé

Distance entre les rangées de poteaux : 4 m

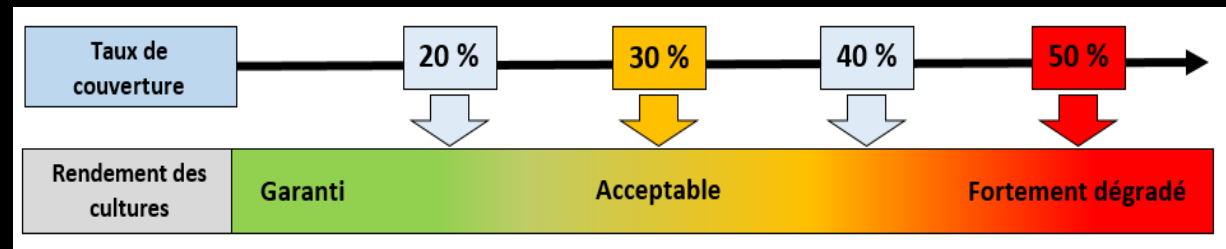
Surface cultivée : 75 %

Taux de couverture : 33%

80% du rendement exigé au Japon

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

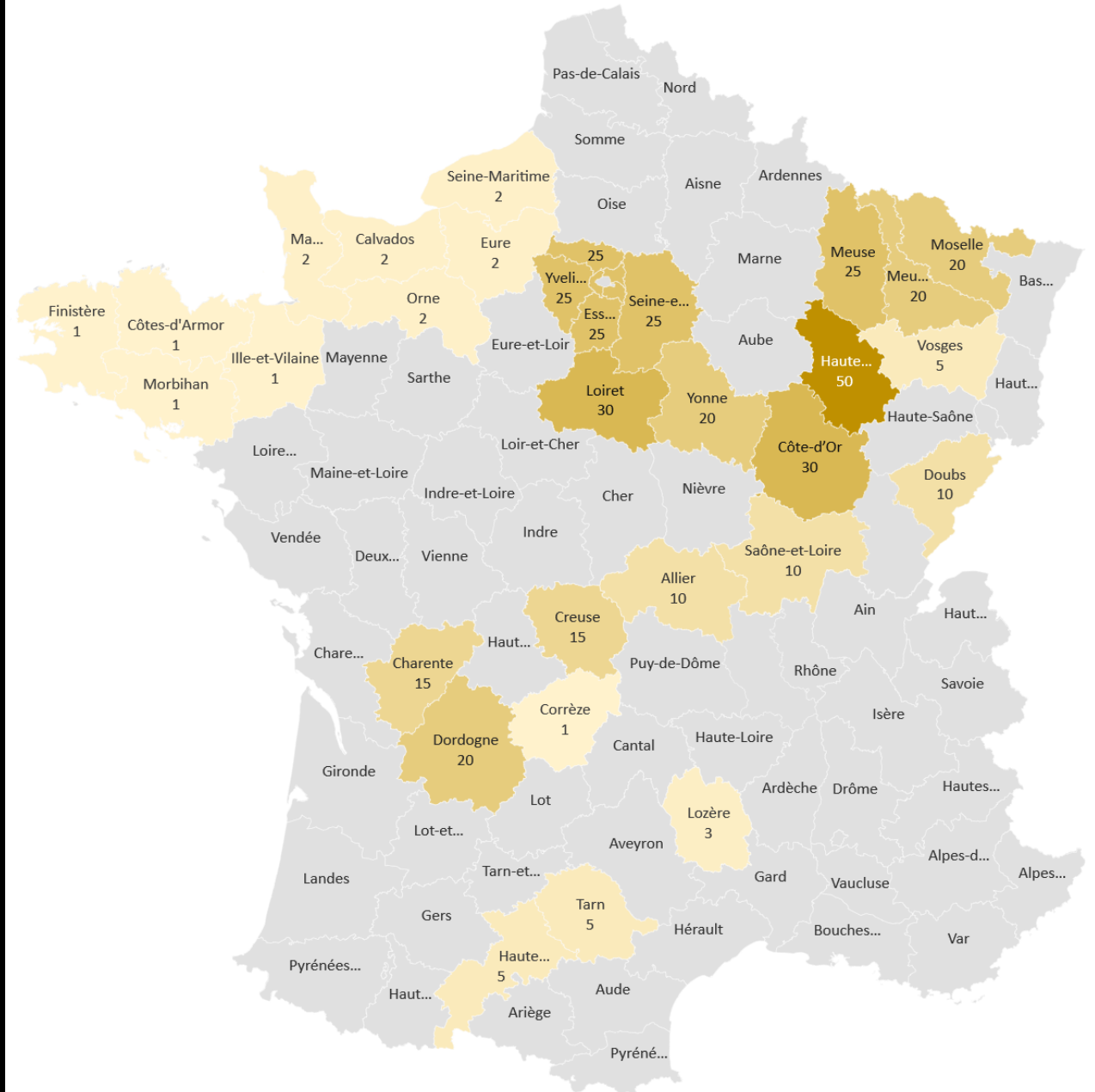
90% en France

Règles locales

Puissance maximale autorisée par projet
(en MWc)

1 to 50

Seuil de puissance maximale par exploitant (34 dép. ont défini un seuil)
(en MWc)



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
- L'AV peut contribuer à la décarbonation de l'agriculture (autoconsommation)
- Une centrale PV classique n'est pas compatible avec une production agricole rentable



Merci pour votre écoute

Contact : christian.dupraz@inrae.fr