



HAL
open science

Compléments sur : “ Décarboner par la production d’énergie ” : ACV sur les GES, modèles économiques, EnR et biodiversité

Pierre Renault, Claire Rogel Gaillard, Cécile Détang-Dessendre

► To cite this version:

Pierre Renault, Claire Rogel Gaillard, Cécile Détang-Dessendre. Compléments sur : “ Décarboner par la production d’énergie ” : ACV sur les GES, modèles économiques, EnR et biodiversité : Séminaire inter-Directions Scientifiques INRAE, 6 juillet 2023. 2023. hal-04232155

HAL Id: hal-04232155

<https://hal.inrae.fr/hal-04232155>

Submitted on 7 Oct 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

➤ Compléments sur : « Décarboner par la production d'énergie » : ACV sur les GES, modèles économiques, EnR et biodiversité)

Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard, Cécile Detang-Dessendre

➤ Plan

1. Importance du thème « Energies renouvelables et biodiversité » dans la littérature et à INRAE
2. ACV sur les émissions de GES ; comparaisons entre énergies fossiles et énergies renouvelable ;
3. Modèles économiques pour la méthanisation et les centrales photovoltaïques



Importance du thème

« Energies renouvelables et biodiversité »

dans la littérature et à INRAE



➤ Place du thème « Energies renouvelables et biodiversité » sur SCOPUS : 1.

TITLE-ABS (("renewable energy") AND (biodiversity)) :

TITLE-ABS (("Renewable energy" OR "Solar panels" OR "Wind turbine*" OR "Energetic culture*" OR "Energetic crop*" OR ("Soil*" AND "Digestat*")) AND (Biodiversity)) :

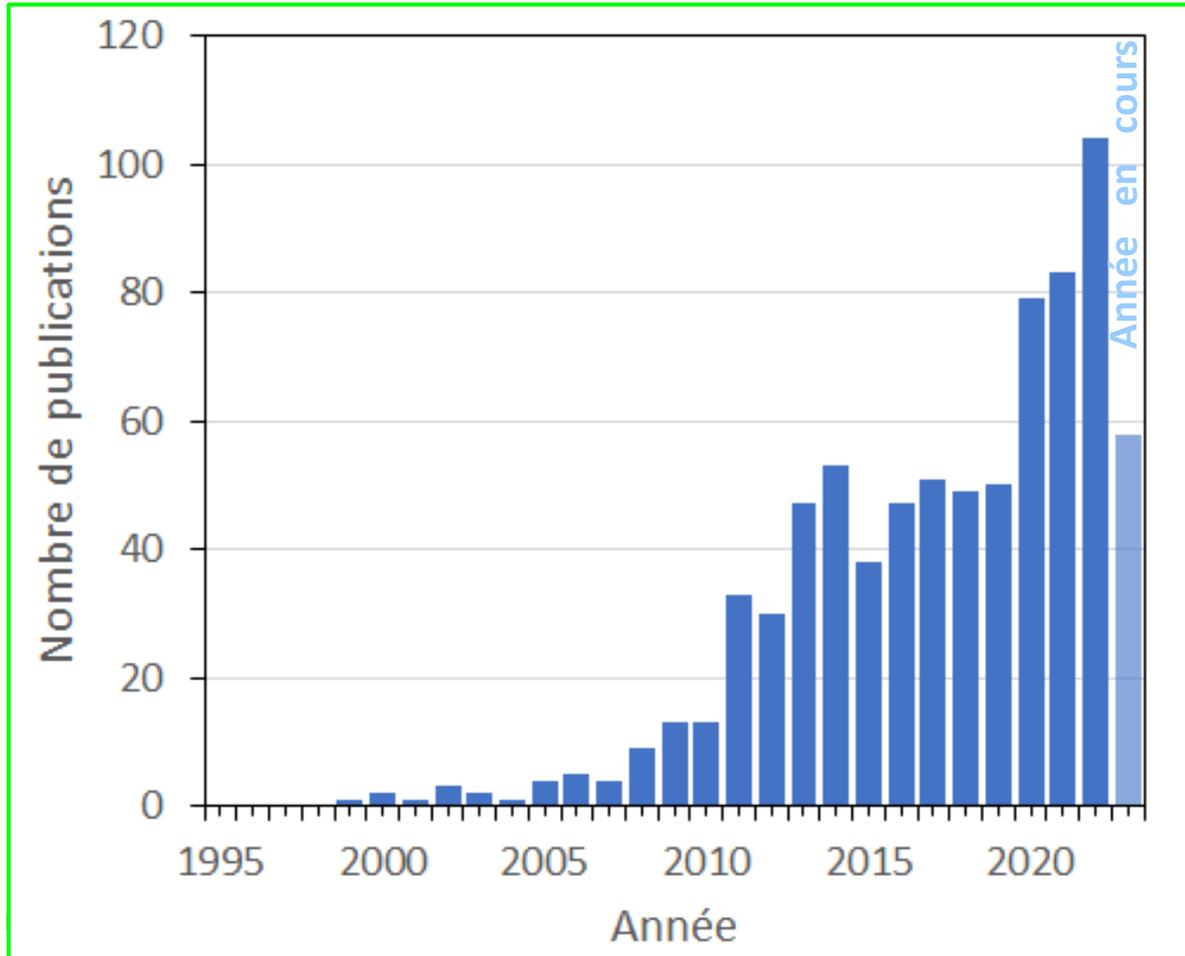
694

Δ ~ 12%

781

« Biodiversité aquatique et EnRs aquatiques (hydroélectricité, PV flottant) » occulté dans les interrogations

TITLE-ABS (("hydropower" OR "hydroelectricity") AND (fish OR fishes)) 1689
 TITLE-ABS (("Solar panels") AND (fish OR fishes)) 68



INRAE

Décarboner par la production d'énergie

06 juillet 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard, Cécile

Et interrogations inadaptées aux forêts et bois-énergie

➤ Place du thème « Energies renouvelables et biodiversité » sur SCOPUS : 2.

Diversité végétale (réduite aux graminées) et des gros gibiers (réduits aux cervidés) très peu présents :

TITLE-ABS (("Renewable energy" OR "Solar panels" OR "Wind turbine*" OR "Energetic culture*" OR "Energetic crop*" OR ("Soil*" AND "Digestat*")) AND (Biodiversity OR Animal* OR Insect* OR Arthropod* OR Bird* OR Bat OR Bats OR Cervid* OR Deer* OR Grass*)) :	Δ ~ 37% ↻	4 328
TITLE-ABS (("Renewable energy" OR "Solar panels" OR "Wind turbine*" OR "Energetic culture*" OR "Energetic crop*" OR ("Soil*" AND "Digestat*")) AND (Biodiversity OR Animal* OR Insect* OR Arthropod* OR Bird* OR Bat OR Bats OR Cervid* OR Deer*)) :	Δ ~ 39% ↻	3 519
TITLE-ABS (("Renewable energy" OR "Solar panels" OR "Wind turbine*" OR "Energetic culture*" OR "Energetic crop*" OR ("Soil*" AND "Digestat*")) AND (Biodiversity OR Animal* OR Insect* OR Arthropod* OR Bird* OR Bat OR Bats)) :	Δ ~ 39% ↻	3 504

Les oiseaux en première position ... en lien avec les éoliennes et un peu le PV :

TITLE-ABS (("Renewable energy" OR "Solar panels" OR "Wind turbine*" OR "Energetic culture*" OR "Energetic crop*" OR ("Soil*" AND "Digestat*")) AND (bird*)) :		854
TITLE-ABS (("Renewable energy" OR "Wind turbine*") AND (bird*)) :		786
TITLE-ABS (("Renewable energy" OR "Solar panels") AND (bird*)) :		387
TITLE-ABS (("Renewable energy" OR "Energetic culture*" OR "Energetic crop*") AND (bird*)) :		318
TITLE-ABS (("Renewable energy" OR ("Soil*" AND "Digestat*")) AND (bird*)) :		319

➤ Place du thème « Energies renouvelables et biodiversité » sur SCOPUS : 3.

Les chauve-souris, objet de nombreux travaux (en lien avec les éoliennes) :

TITLE-ABS (("Renewable energy" OR "Solar panels" OR "Wind turbine*" OR "Energetic culture*" OR "Energetic crop*" OR ("Soil*" AND "Digestat*")) AND (bat OR bats)) :	526
TITLE-ABS (("Renewable energy" OR "Wind turbine*") AND (bat OR bats)) :	518
TITLE-ABS (("Renewable energy" OR "Solar panels") AND (bat OR bats)) :	213
TITLE-ABS (("Renewable energy" OR "Energetic culture*" OR "Energetic crop*") AND (bat OR bats)) :	206
TITLE-ABS (("Renewable energy" OR ("Soil*" AND "Digestat*")) AND (bat OR bats)) :	206

Insectes (et de façon anecdotique autres arthropodes) :

TITLE-ABS (("Renewable energy" OR "Solar panels" OR "Wind turbine*" OR "Energetic culture*" OR "Energetic crop*" OR ("Soil*" AND "Digestat*")) AND (insect* OR arthropod*)) :	259
TITLE-ABS (("Renewable energy" OR "Solar panels" OR "Wind turbine*" OR "Energetic culture*" OR "Energetic crop*" OR ("Soil*" AND "Digestat*")) AND (insect*)) :	250

dont les insectes polarotactiques, les pollinisateurs et les lépidoptères :

TITLE-ABS (("Renewable energy" OR "Solar panels" OR "Wind turbine*" OR "Energetic culture*" OR "Energetic crop*" OR ("Soil*" AND "Digestat*")) AND ("aquatic insect*" OR polarotactic OR ephemeropt*)) :	13
TITLE-ABS (("Renewable energy" OR "Solar panels" OR "Wind turbine*" OR "Energetic culture*" OR "Energetic crop*" OR ("Soil*" AND "Digestat*")) AND ("pollinating" OR "pollinator*")) :	13
TITLE-ABS (("Renewable energy" OR "Solar panels" OR "Wind turbine*" OR "Energetic culture*" OR "Energetic crop*" OR ("Soil*" AND "Digestat*")) AND (lepidopt*)) :	4

Avec du hors-sujet



INRAE

Décarboner par la production d'énergie

06 juillet 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard, Cécile Detang-Dessendre

➤ Place du thème « Energies renouvelables et biodiversité » sur SCOPUS : 4.

TITLE-ABS (("renewable energy" OR "Solar panels") AND (biodiversity OR animal* OR insect*) AND ("pollinating" OR "pollinator*")) :

~ 8 publications pertinentes sur 13

2013 : On estimating the economic value of insectivorous bats: Prospects and priorities for biologists

2014 : Landscape composition influences pollinators and pollination services in perennial biofuel plantings

2014 : Modeling pollinator community response to contrasting bioenergy scenarios

2018 : Renewed vision shines light on dormant nuclear site

2018 : Examining the Potential for Agricultural Benefits from Pollinator Habitat at Solar Facilities in the United States

2018 : Planning ground based utility scale solar energy as green infrastructure to enhance ecosystem services

2019 : Productivity and diversity of annually harvested reconstructed prairie communities

2020 : Land Conversion for Solar Facilities and Urban Sprawl in Southwest Deserts Causes Different Amounts of Habitat Loss for Ashmeadiella Bees

2021 : Honeybee pollination benefits could inform solar park business cases, planning decisions and environmental sustainability targets

2021 : Modeling the ecosystem services of native vegetation management practices at solar energy facilities in the Midwestern United States

2021 : Partial shading by solar panels delays bloom, increases floral abundance during the late-season for pollinators in a dryland, agrivoltaic ecosystem

2023 : The development of utility-scale solar projects on US agricultural land: opportunities and obstacles

2023 : Vegetation Management Cost and Maintenance Implications of Different Ground Covers at Utility-Scale Solar Sites



INRAE

Décarboner par la production d'énergie

06 juillet 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard, Cécile Detang-Dessendre

➤ Place du thème « Energies renouvelables et biodiversité » sur *SCOPUS* : 5.

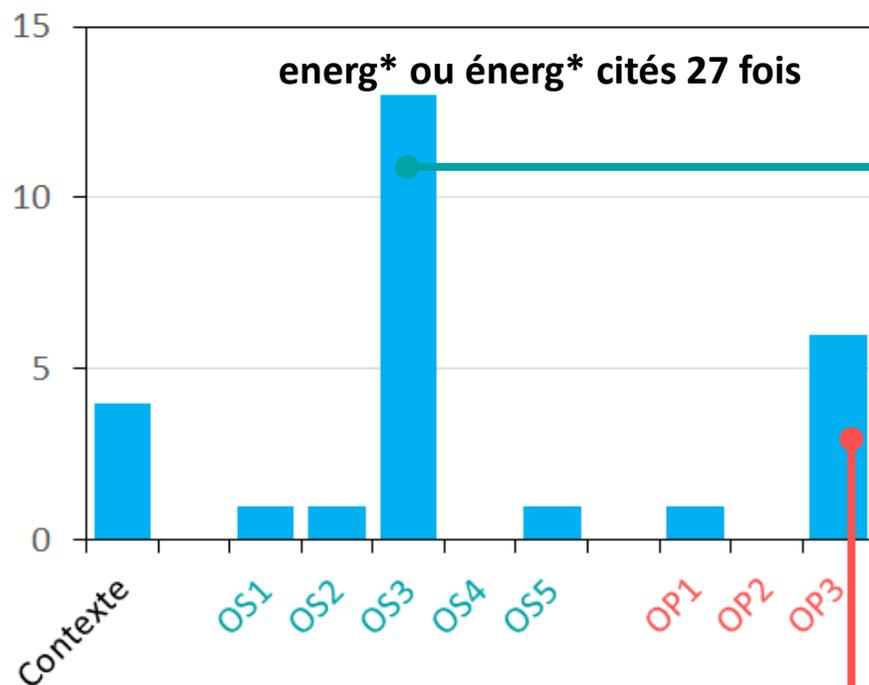
Au final, une littérature très éparse, privilégiant « éoliennes ET (oiseaux OU chauve-souris) » :

TITLE-ABS ()	("Solar panels")	("Wind turbine*")	("Soil*" AND "Digestat*")	("Biofuel*")
AND (Soil invertebrate*)	0	0	2	1
AND (Microbiol*)	6	6	24	422
AND (Earthworm*)	1	1	12	15
AND (Grass*)	48	154	74	1 496
AND (Insect* OR Arthropod*)	55	0	0	0
AND ("aquatic insect*" OR polarotactic OR ephemeropt*)	11	0	0	1
AND ("pollinating" OR "pollinator*")	2	1	0	45
AND (Bird*)	82	551	1	82
AND (Bat OR Bats)	12	377	0	7
AND (Cervid* OR Deer*)	0	0	0	0



➤ Place du thème « Energies renouvelables (et biodiversité) » à INRAE : 1.

Les énergies renouvelables dans INRAE 2030 :



OS3 : Une bioéconomie basée sur une utilisation sobre et circulaire des ressources

- Filières énergétiques ;
- Utilisation en cascade de la biomasse « jusqu'à l'énergie » ;
- Energies renouvelables ;
- Bioénergies ;

Et aussi : méthaniseur, biogaz, digestat, agri-photovoltaïsme

Le volet « énergie » implicitement très présent :

• Dans les OS1 et OS2 :

- Forêts et bois énergie ;
- Méthanisation : CIVE, digestats, biodiversité ... ;
- (Pré-)traitement autres de biomasses : pour méthanisation, biocarburants, stockage d'énergie (méthanation) ... ;
- Phovoltaïsme (artificialisation sols, lien aux productions ...) ;
- Hydroélectricité

OP3 : La stratégie RSE

- Réduction de consommation ;
- Le recours aux EnR.

• Dans l'OP1 :

- Implication forte dans la SNBC-3, au niveau de la CRE, en éclairage des élus (Sénat, Assemblée Nationale ...).



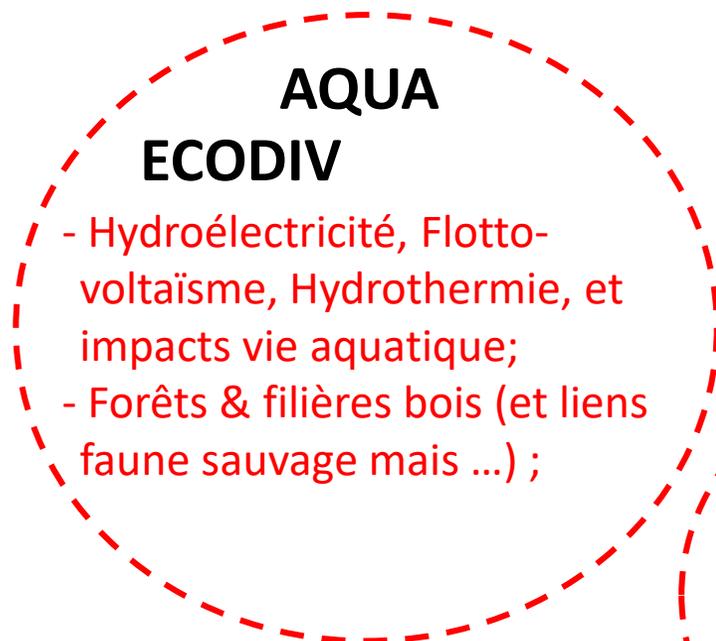
INRAE

Décarboner par la production d'énergie

06 juillet 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard, Cécile Detang-Dessendre

➤ Place du thème « Energies renouvelables (et biodiversité) » à INRAE : 2.

Activités des départements :



ACT

MICA



ALIMH



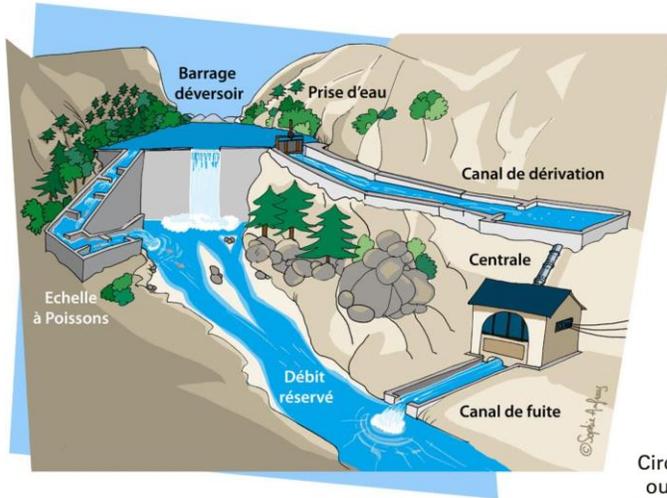
INRAE

Décarboner par la production d'énergie

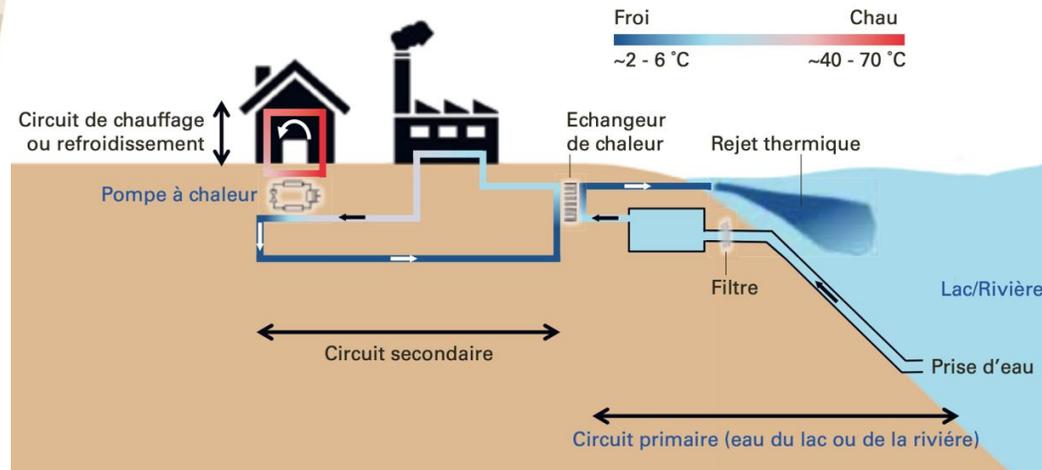
06 juillet 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard, Cécile Detang-Dessendre

➤ Place du thème « Energies renouvelables (et biodiversité) » à INRAE : 3.

Pôle ECLA (et Pôle MIAME) :



- **Hydroélectricité** : marnage et flux sédimentaires, biodiversité (passes à poissons, continuité biologique et débits minimums), bilans de C et GES



- **Hydrothermie** : impacts sur les communautés biologiques (peu étudiés)

- **Photovoltaïsme flottant** : Impacts (en cascade) sur lumière, évaporation turbulence, températures, production primaire ...



INRAE

Décarboner par la production d'énergie

06 juillet 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard, Cécile Detang-Dessendre

➤ Place du thème « Energies renouvelables (et biodiversité) » à INRAE : 4.

PNR-Agri-PV :



Pôle national de recherche, innovation, enseignement sur l'agrivoltolaïsme

Impacts sur :

- **Cultures** : la protection contre les événements extrêmes, le microclimat (HR, T ...), la consommation d'eau, la plante et sa production ... ;
- **Forêts** : le bilan C et microclimat associé au déboisement pour du photovoltaïque ;
- **Prairies** : leur composition floristique, leur production et sa qualité ;
- **B.E.A.** : l'alimentation, l'habitat, la santé et le comportement animal.



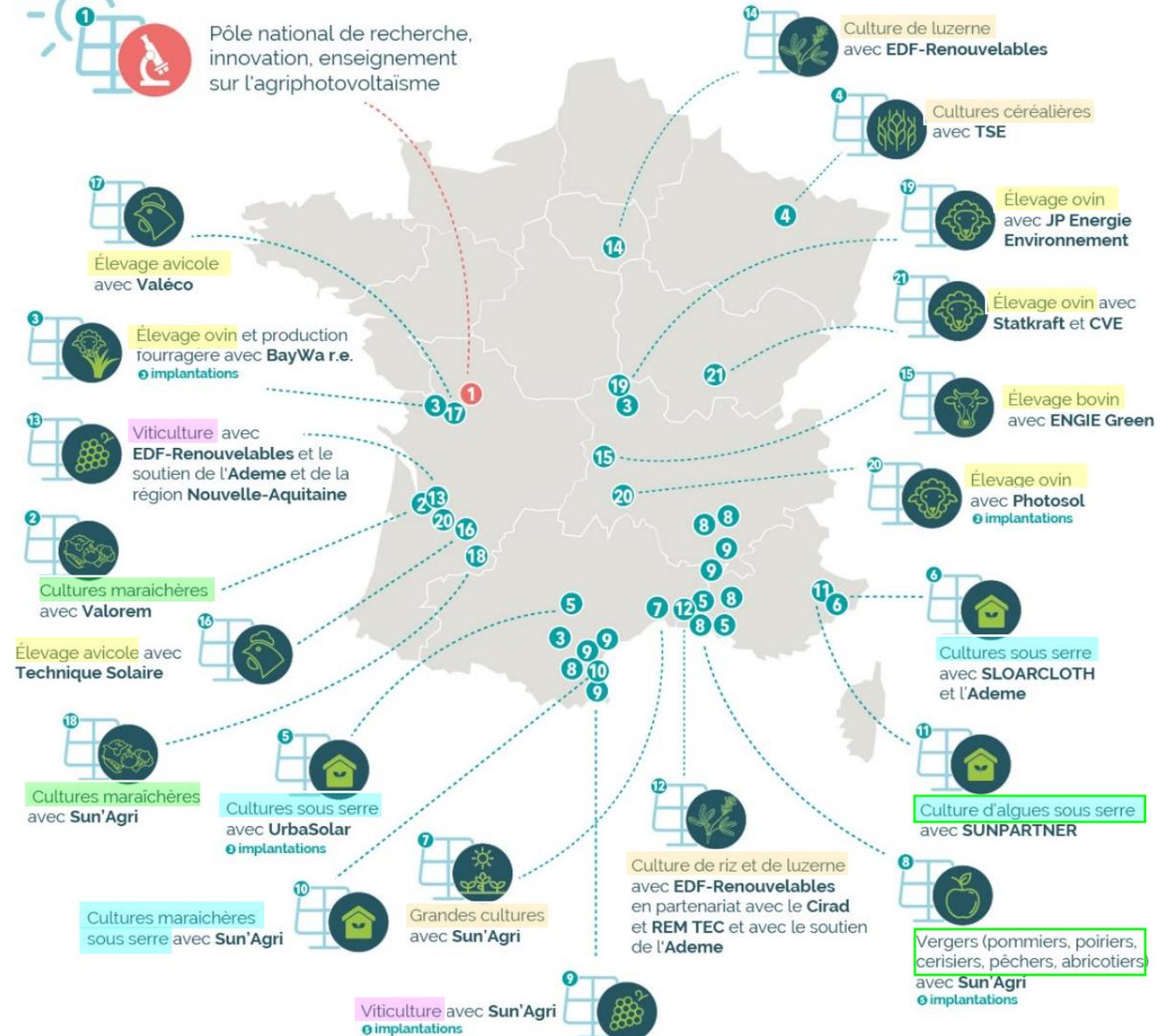
INRAE

Décarboner par la production d'énergie

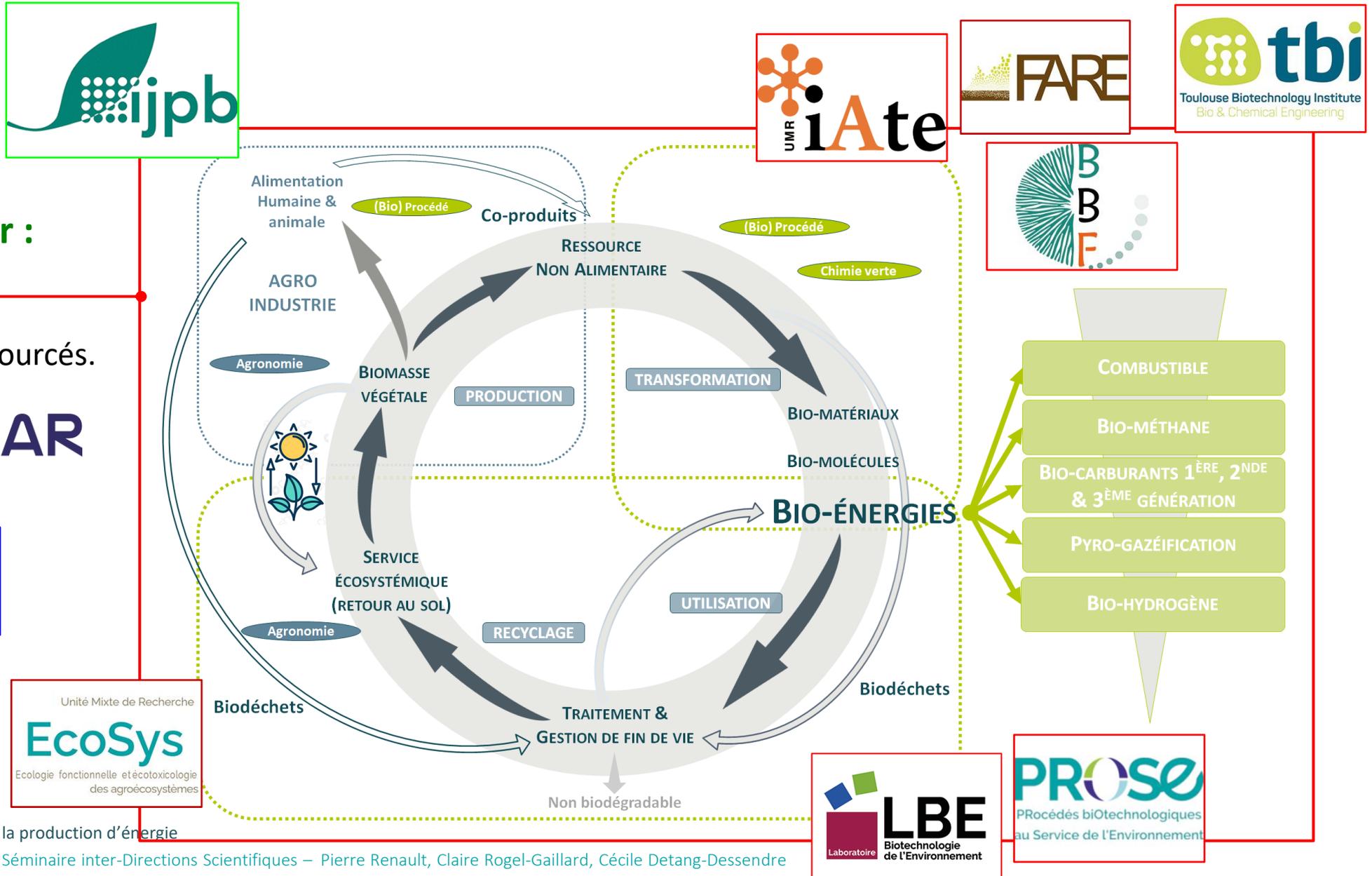
06 juillet 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-



Pôle national de recherche, innovation, enseignement sur l'agrivoltolaïsme



➤ Place du thème « Energies renouvelables (et biodiversité) » à INRAE : 5.



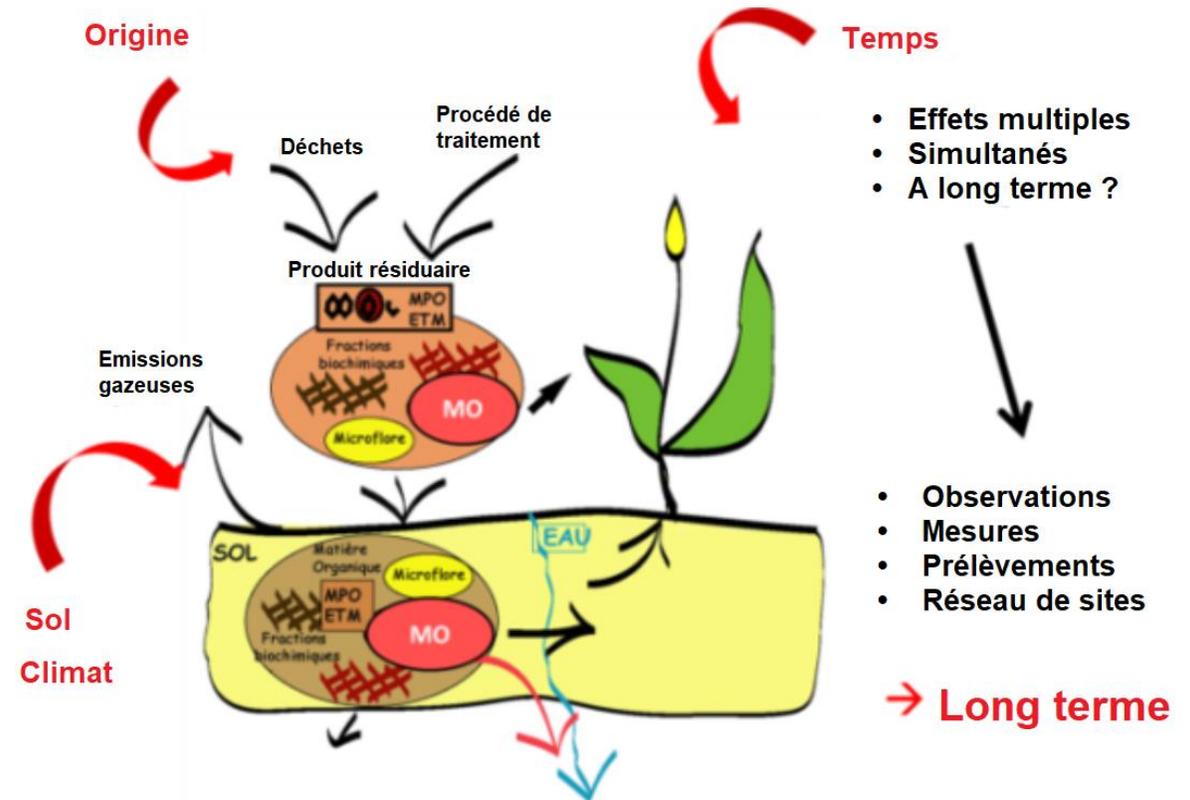
➤ Place du thème « Energies renouvelables (et biodiversité) » à INRAE : : 6.

Le SOERE PRO :



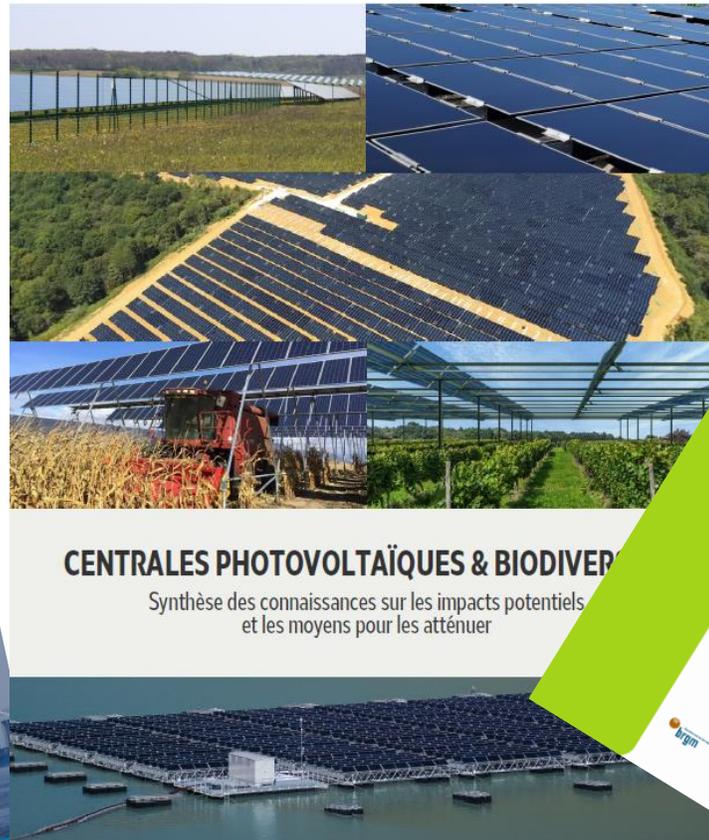
Ses objectifs : évaluer les effets des apports de divers PRO (**dont les digestats de méthanisation**) sur :

- La dynamique des MO, et les cycles biogéochimiques des éléments majeurs associés ;
- Le potentiel de substitution des engrais par les PRO (N,P...) ;
- Les impacts environnementaux associés : émissions gazeuses, lixiviation de NO_3^- ... ;
- **Les propriétés** physiques, chimiques et **biologiques**, et le fonctionnement des sols ;
- L'apport et le devenir de contaminants, et **les risques écotoxicologiques associés**.



➤ Des sujets « Energies renouvelables et biodiversité » peu traités : 1.

Un sujet récent de préoccupations :



(LPO, 2022)



(Niang et Goffaux, 2022)



➤ Des sujets « Energies renouvelables et biodiversité » peu traités : 2.

Impacts des USSE (utility-scale solar energy) sur le vivant :

- Changement microclimat local (albédo, température au sol, hygrométrie, voir vent) : ombres pluviales et solaires, zones de ruissellement important ;
- Création de parcelles à faible et forte productivités → affecte les assemblages d'invertébrés → reste peu étudié ainsi que leurs conséquences

(impact PV fonction taille centrale, topographie paysage, type de terrain, distance /écosystèmes sensibles, biodiversité)

Table 1. Known or expected potential impacts of USSE on a subset of species and groups of organisms

		Habitat fragmentation	Panels and mirrors	Fences*	Air-cooled condenser (CSP only)	High-energy flux field (CSP only)
Birds	Passerines and insectivorous birds	–	–	o	–	–
	Raptors	o	–	o	o	–
	Ravens	+	o	+	o	+
	Waterbirds	o	–	o	o	o
Mammals	Bats	o	+	o	–	o
	Bighorn sheep	–	o	–	o	o
	Coyotes	–	o	–	o	o
	Kit foxes	o	+	+/-	o	o
Reptiles	Desert tortoises	–	o	–	o	o
Insects	Flying insects	–	–	o	–	–
Plants	Native annuals	–	o	–	o	o
	Native perennials	–	–	–	o	o
	Invasive plants	o	o	+	o	o
Total type disturbance known effect	Negative	7	5	5	3	3
	Positive	1	2	2	0	1

Notes: Impacts are listed as positive (+), negative (–), or neutral (o) based on experience and judgment of the authors and citations. We used a rule of preponderance. Ratings were assigned based on the majority of evidence from the literature; expectations were based on knowledge of the ecology, behavior, and life-history traits of an organism or group. Each cell is a testable hypothesis and research opportunity; additional research will likely change some of our predictions. See WebPanel I for additional details and citations. *Fences that are designed to be permeable can benefit wildlife survival; fences that are impermeable to movement fragment habitat and have negative impacts.

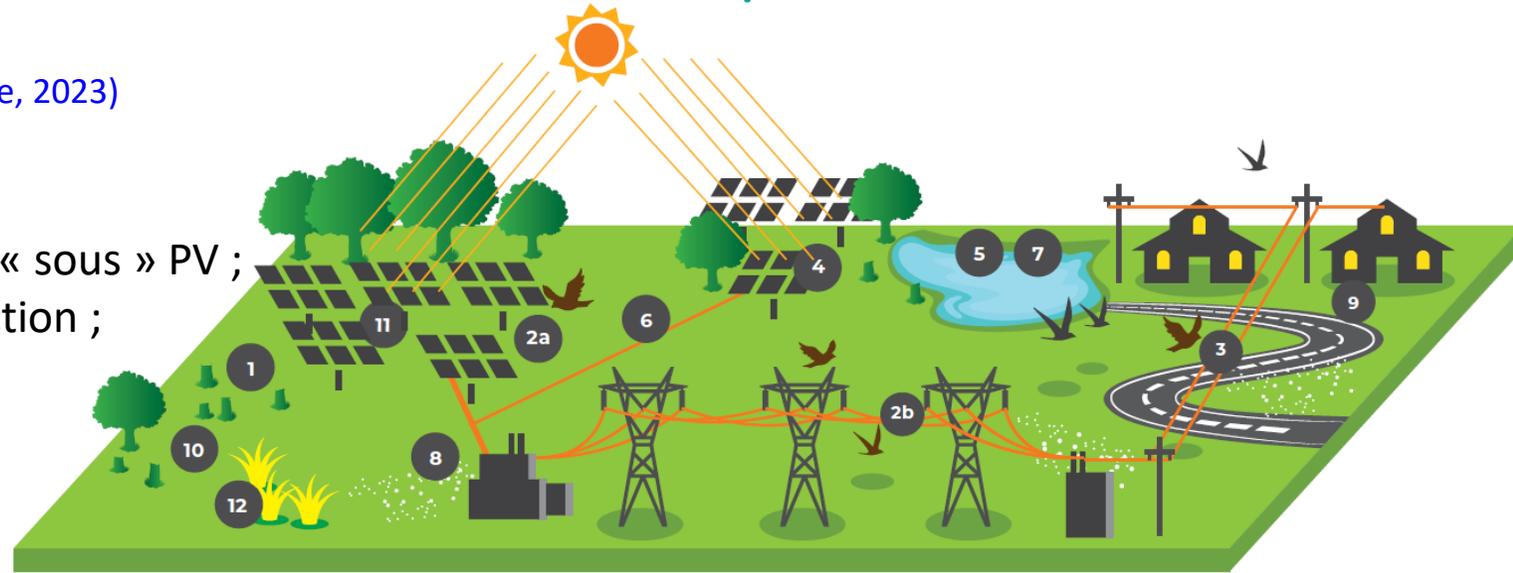
CSP:
concentrating
solar power

(Moore-O'Leary
et al., 2017)

➤ Des sujets « Energies renouvelables et biodiversité » peu traités : 2.

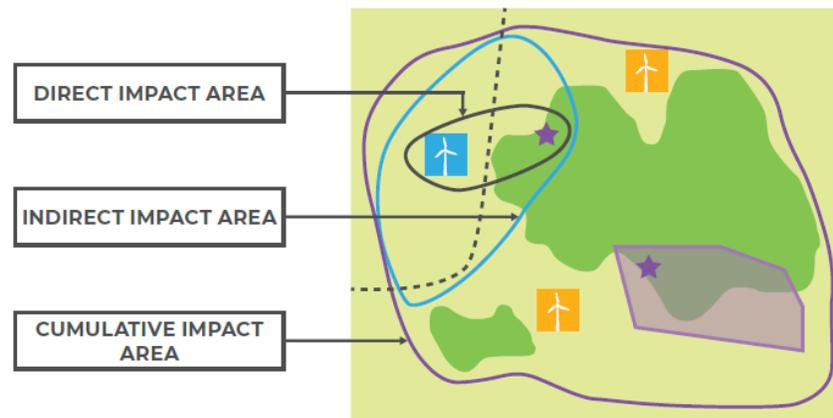
EnR, insectes et autres arthropodes : (Lavigne, 2023)

- Localement :
 - Perte ou modification de l'habitat ;
 - Modification du microclimat et de la flore « sous » PV ;
 - Mortalité directe ou difficulté de reproduction ;
- A l'échelle du paysage :
 - Une réduction des ressources ;
 - Une fragmentation de l'habitat.



1. Loss of habitat through clearance or displacement of land
2. Bird collision with (a) solar panels, and (b) transmission lines
3. Bird and bat mortality through electrocution on distribution lines
4. Displacement due to attraction to reflective surface of solar panels
5. Wildlife mortality due to attraction to evaporation ponds
6. Barrier effects to terrestrial biodiversity movement
7. Habitat degradation due to changes in hydrology and water availability and quality
8. Pollution (e.g. dust, light, noise and vibration, solid/liquid waste)
9. Indirect impacts from displaced land-uses, induced access or increased economic activity
10. Associated ecosystem service impacts
11. Habitat alteration due to changes in microclimatic effect of solar panels
12. Introduction of alien species

(Bennun et al., 2021)

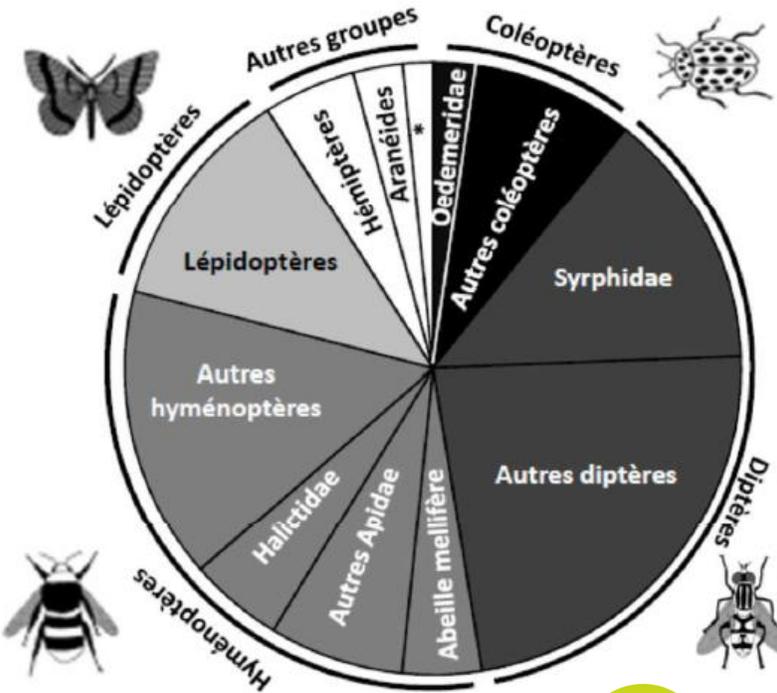


- PROJECT SITE
- EXISTING WIND FARMS
- MODIFIED HABITAT
- NATURAL HABITAT
- KEY BIODIVERSITY AREA
- VULTURE COLONY
- NEW ROAD DEVELOPMENT

Des impacts directs, indirects et cumulés

(Bennun et al., 2021)

➤ Des sujets « Energies renouvelables et biodiversité » peu traités : 3.



Des pollinisateurs au-delà de l'abeille domestique :

- 80-90% des plantes à fleurs dépendent, au moins en partie, des pollinisateurs pour leur reproduction ;
- Dont des plantes sauvages, support de la biodiversité sauvage des agroécosystèmes (dont des auxiliaires des cultures) ;
- Quelques espèces ne dépendent pas des pollinisateurs (riz, maïs, blé), **MAIS le rendement de 3/4 des espèces cultivées (35% de la production alimentaire) est amélioré par leur présence ;**

(Porcher et Fontaine, 2021)



Avec la possibilité de tourner un problème en allié (restauration pollinisation pour soja, luzerne, coton, amandes et agrumes aux USA) :

(Walston et al., 2018)



Examining the Potential for Agricultural Benefits from Pollinator Habitat at Solar Facilities in the United States

Leroy J. Walston,^{*,†} Shruti K. Mishra,[†] Heidi M. Hartmann,[†] Ihor Hlohowskyj,[†] James McCall,[‡] and Jordan Maclnick[‡]

[†]Environmental Science Division, Argonne National Laboratory, Lemont, Illinois 60439, United States

[‡]National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado 80401, United States

Supporting Information

ABSTRACT: Of the many roles insects serve for ecosystem function, pollination is possibly the most important service directly linked to human well-being. However, land use changes have contributed to the decline of pollinators and their habitats. In agricultural landscapes that also support renewable energy developments such as utility-scale solar energy [USSE] facilities, opportunities may exist to conserve insect



Impact des éoliennes sur les colonies d'abeilles domestiques
(Julie Fourrier (itsap) en lien avec INRAE)



INRAE

have published articles.

This is an open access article published under an ACS AuthorChoice License, which permits copying and redistribution of the article or any adaptations for non-commercial purposes.



Cite This: Environ. Sci. Technol. 2018, 52, 7566–7576

pubs.acs.org/est

➤ Des sujets « Energies renouvelables et biodiversité » peu traités : 4.

Des insectes aquatiques / polarotactiques attirés par les panneaux PV ...

- Plusieurs espèces d'odonates (libellules), d'éphémères (Ephemeroptera), de trichoptères (Trichoptera), de diptères (Dolichopodidae) et de mouches tabanidées (Tabanidae) ;
 - Les éphémères (Ephemeroptera), les trichoptères (Trichoptera), les diptères dolichopodidés et les tabanidés (Tabanidae) ont été les plus attirés par les panneaux solaires et ont présenté un comportement de ponte au-dessus des panneaux solaires plus souvent qu'au-dessus de surfaces ayant des degrés de polarisation plus faibles (y compris l'eau) ;

(Horvath et al., 2010)

... attirant des prédateurs insectivores sur ces panneaux (oiseaux (bergeronnettes, les moineaux, les mésanges charbonnières), chauve-souris).

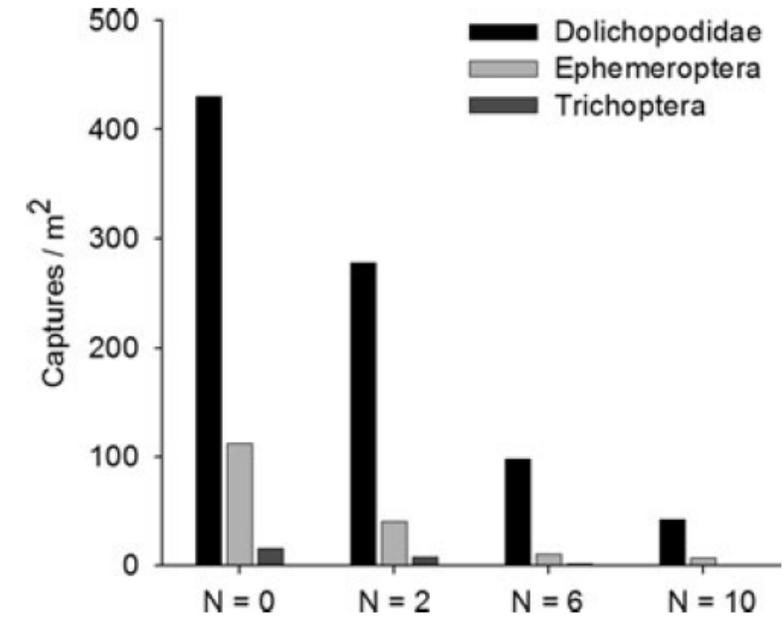
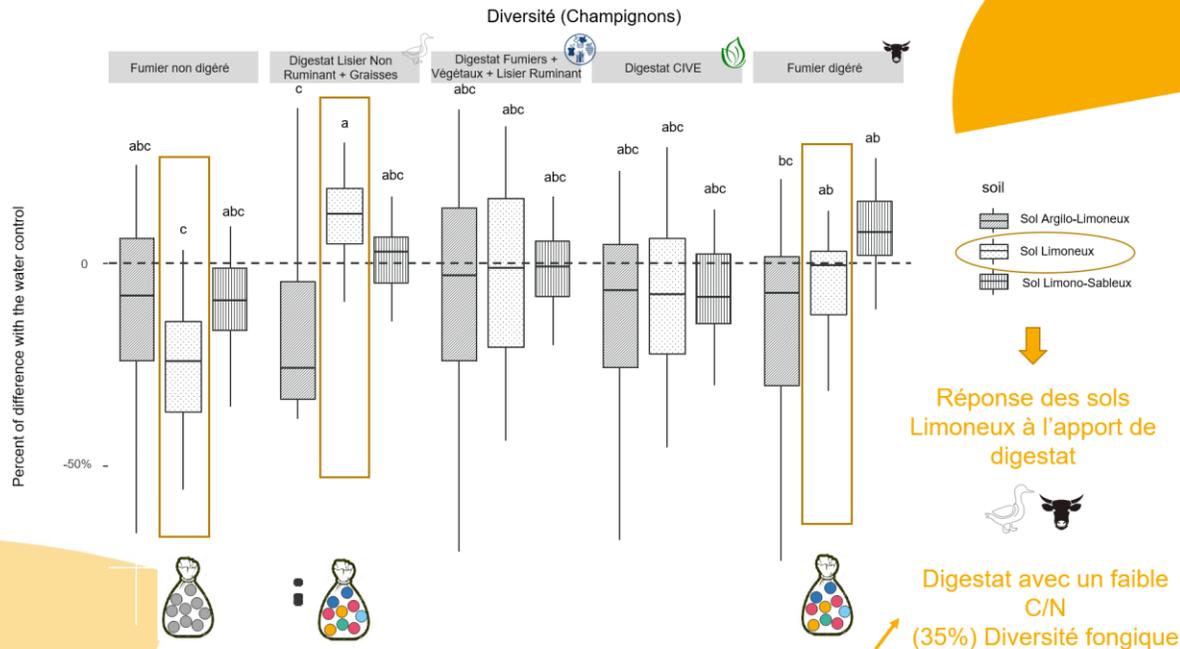


Figure 4. The surface density (captures per square meter) of polarotactic dolichopodid (Diptera), mayflies (Ephemeroptera), and Philopotamus (Trichoptera) trapped by a highly and horizontally polarizing sticky surface with different numbers (N) of orthogonal white strips (Fig. 3).

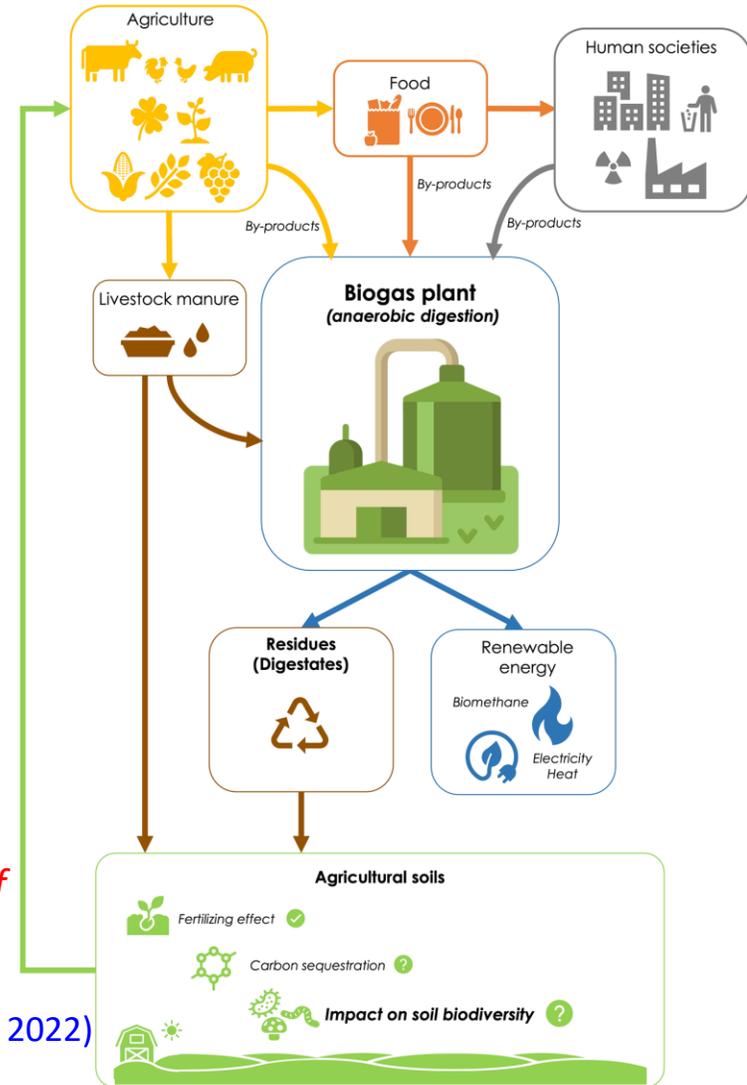
➤ Des sujets « Energies renouvelables et biodiversité » peu traités : 5.

Impact des épandages de digestats de méthanisation sur la biodiversité du sol :

- Des travaux en cours liés à la diversité microbienne du sol ...



(Bourgeteau-Sadet, 2023)



“we reviewed the impact of digestates published in 56 articles reporting 23 microbial parameters. Half of the articles show neutral effects of biogas digestates and 7% showed negative effects. 25% of the articles show more stimulation of the soil microbial quality by biogas digestates, whereas 17% of the articles show less stimulation, compared to other organic fertilizers”

(Karimi et al. 2022)

- Des impacts variables sur les vers de terre ; peu de travaux sur la micro- et mésofaune du sol ... (Moinard et al. 2022)



INRAE

Décarboner par la production d'énergie

06 juillet 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard, Cécile Detang-Dessendre

➤ Au-delà des thèmes ponctuels : 1.

Compatibilité entre transitions énergétique et transition agroécologique ? (jusqu'où la biomasse-énergie ?)

→ **Différents regards** : Emissions de GES (ACV) ... et préservation des sols ;

(En R vs fossiles) Biodiversité ;

Pesticides ;

Economique.

(Bernet, 2023 ; Launay, 2023 ...)

Pour que la méthanisation soit compatible avec la transition agroécologique :

- ✓ Transition vers une autonomie en fertilisants (retour au sol de déchets du territoire, culture intermédiaires conduites dans une logique extensive, maîtrise des pertes de nutriments à chaque étape...) ;
- ✓ Transition vers des systèmes utilisant moins de produits phytosanitaires ;
- ✓ Contribution de la méthanisation au maintien ou à la réintroduction de cultures pérennes (prairies ...) dans un contexte de diminution ou d'absence d'élevage sur certains territoires ;
- ✓ Développement de cultures intermédiaires à valorisation énergétique maximisant d'autres services environnementaux que la production d'énergie (associations d'espèces...) ;
- ✓ Développement de systèmes de méthanisation favorisant la biodiversité ;
- ✓ Systèmes de méthanisation conçus dans une logique d'autonomie énergétique des exploitations (sobriété du procédé, couverture en premier lieu des besoins de l'exploitation).

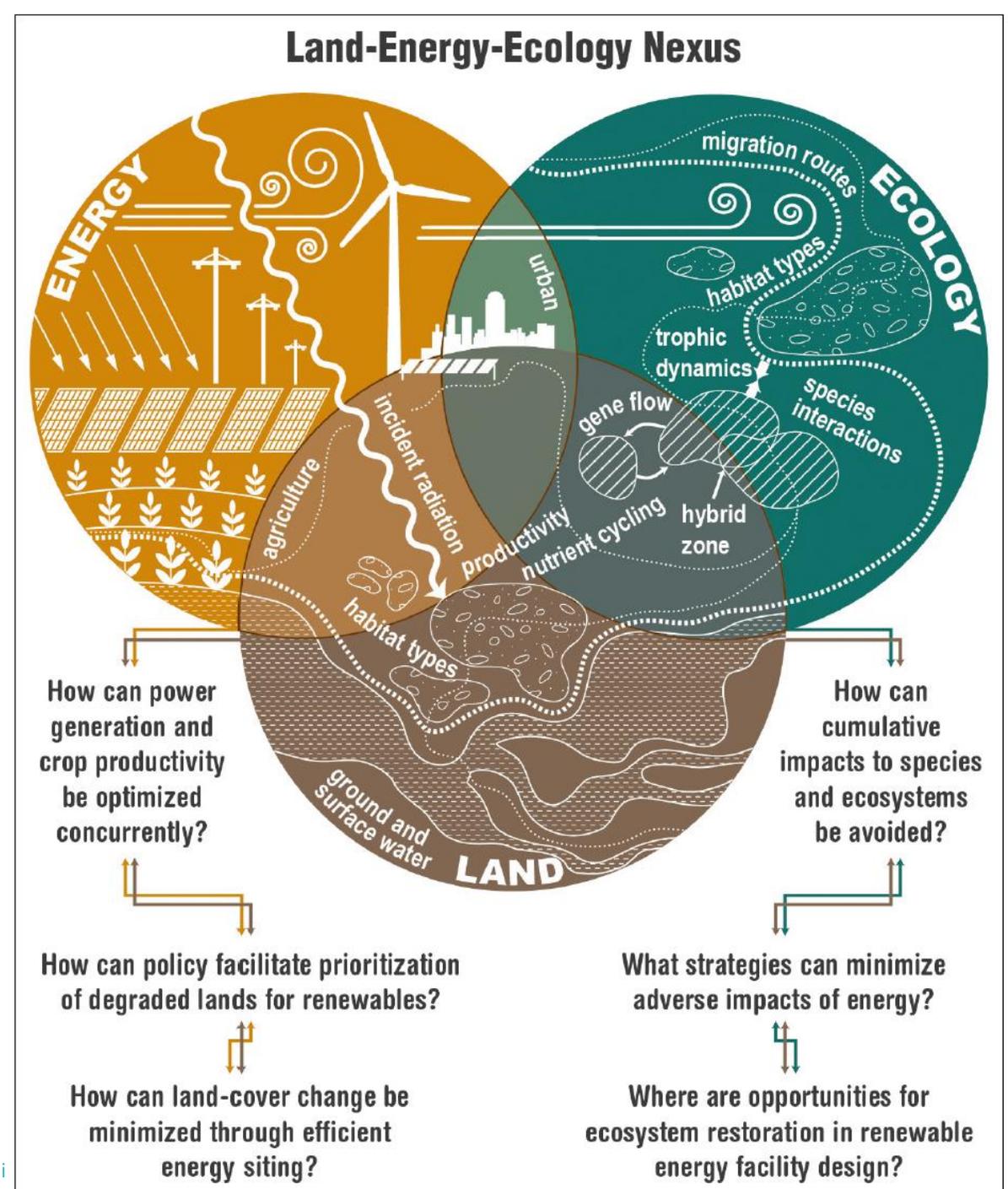
(Bernet, 2023)

Des points d'attention similaires pour les autres EnR :

- **PV flottant, photosynthèse, anoxie et émissions de N₂O et CH₄ ;** (Baudouin et Guillard, 2023)
- **PV au sol et risque de baisse de teneur en C_{org} du sol ;**
(Loustau, 2023)
- ...

➤ Au-delà des thèmes ponctuels : 2.

(Moore-O'Leary et al., 2017)



ACV sur les émissions de GES ; comparaisons entre énergies fossiles et énergies renouvelables



➤ Analyse de Cycle de Vie (ACV) pour le photovoltaïsme

(Payet et al., 2014)

Phases de démantèlement :

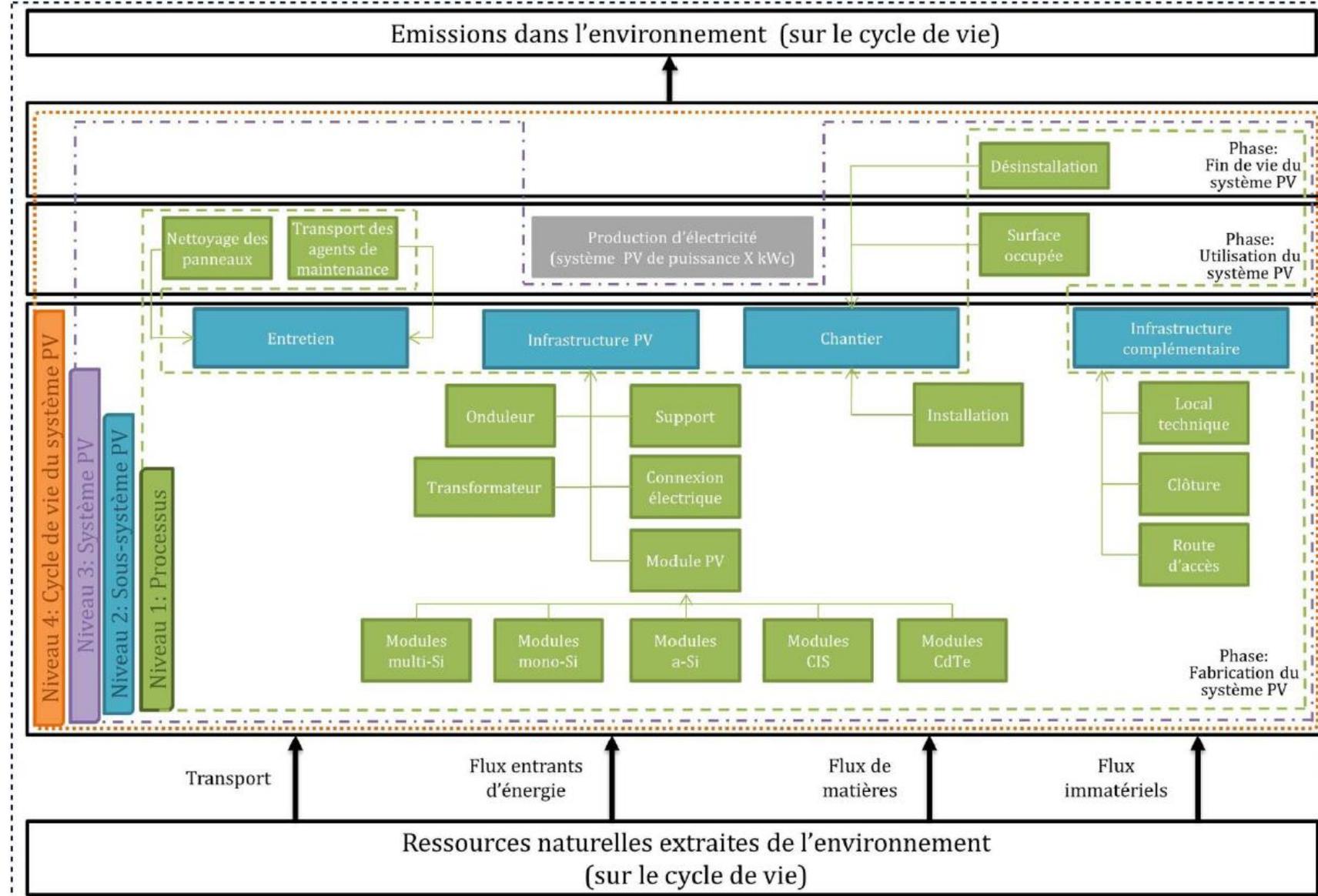
- contribue fortement à

Phases d'exploitation et de démantèlement :

- Emissions de GES dans cette phase ? (si appauvrissement du sol en C organique ?)

Phase de construction (panneaux, accessoires (onduleurs, transformateurs, câbles ...)) ayant le plus d'impacts environnementaux :

Transport et installation :



INRAE

Décarboner par la production d'énergie

06 juillet 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard, Cécile Detang-Dessendre

➤ Analyse de Cycle de Vie (ACV) pour le photovoltaïsme

Comparative life cycle carbon footprint results for the studied renewable energy systems.

	Carbon Footprint [g CO ₂ -eq/kWh] *	References	Carbon Footprint [g CO ₂ -eq/kWh] **
a-Si PV			43.5
CIS PV	26–60	[40,42–44]	39.5
mc-Si PV			44.3
sc-Si PV			52.4
Flat plate collector	20–45	[42,44]	23.8
Vacuum tube collector			22.2
Wind	9–35	[40,42–44]	
Geothermal plant	6–79	[40,43,44]	
Hydroelectric	1–24	[42–44]	
Nuclear	4–110	[40,44,45]	
Natural gas	410–650	[40,41,44]	
Oil	778	[40,41,44]	
Coal	740–1050	[40,41,44]	

(Milousi et al., 2019)

* Results based on bibliographic references, ** Results from this study.



INRAE

Décarboner par la production d'énergie

06 juillet 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard, Cécile Detang-Dessendre

➤ Analyses de Cycles de Vie (ACV)

Table 2. Aggregated LCA inventory results for the studied PV systems.

Impact Category	Unit	a-Si	CIS	mc-Si	sc-Si
Global warming	kg CO ₂ -eq /kWh	4.35×10^{-2}	3.95×10^{-2}	4.43×10^{-2}	5.24×10^{-2}
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11-eq/kWh	1.70×10^{-8}	1.75×10^{-8}	2.06×10^{-8}	2.45×10^{-8}
Ionizing radiation	kBq Co-60-eq/kWh	3.95×10^{-3}	3.96×10^{-3}	4.08×10^{-3}	4.45×10^{-3}
Ozone formation, human health	kg NO _x -eq/kWh	9.83×10^{-5}	9.09×10^{-5}	1.05×10^{-4}	1.20×10^{-4}
Fine particulate matter formation	kg PM _{2,5} -eq/kWh	1.09×10^{-4}	9.39×10^{-5}	1.04×10^{-4}	1.23×10^{-4}
Ozone formation, terrestrial ecosystems	kg NO _x -eq/kWh	1.01×10^{-4}	9.26×10^{-5}	1.10×10^{-4}	1.25×10^{-4}
Terrestrial acidification	kg SO ₂ -eq/kWh	2.25×10^{-4}	2.07×10^{-4}	2.21×10^{-4}	2.47×10^{-4}
Freshwater eutrophication	kg P-eq/kWh	3.55×10^{-5}	4.62×10^{-5}	3.78×10^{-5}	4.07×10^{-5}
Terrestrial ecotoxicity	kg1,4-DCB-eq/kWh	4.69×10^{-1}	4.62×10^{-1}	1.17	1.13
Freshwater ecotoxicity	kg1,4-DCB-eq/kWh	1.11×10^{-2}	1.30×10^{-2}	1.16×10^{-2}	1.17×10^{-2}
Marine ecotoxicity	kg1,4-DBC-eq/kWh	1.43×10^{-2}	1.69×10^{-2}	1.53×10^{-2}	1.54×10^{-2}
Human carcinogenic toxicity	kg1,4-DBC-eq/kWh	6.50×10^{-3}	4.19×10^{-3}	4.17×10^{-3}	4.33×10^{-3}
Human non-carcinogenic toxicity	kg1,4-DBC-eq/kWh	1.46×10^{-1}	2.00×10^{-1}	1.63×10^{-1}	1.64×10^{-1}
Land use	m ² a crop-eq/kWh	1.13×10^{-3}	9.60×10^{-4}	1.23×10^{-3}	1.23×10^{-3}
Mineral resource scarcity	kg Cu-eq/kWh	6.60×10^{-4}	8.21×10^{-4}	5.54×10^{-4}	5.42×10^{-4}
Fossil resource scarcity	kg oil-eq/kWh	1.04×10^{-2}	9.40×10^{-3}	1.08×10^{-2}	1.27×10^{-2}
Water consumption	m ³ /kWh	4.51×10^{-4}	3.22×10^{-4}	1.35×10^{-3}	1.17×10^{-3}

(Milousi et al.,
INRAE 2019)



➤ ACVs pour la méthanisation, la pyro-gazéification et le power-to-gas

(ADEME, 2018)

MÉTHANISATION

Production de méthane en utilisant des micro-organismes qui dégradent la matière organique

PYRO-GAZÉIFICATION

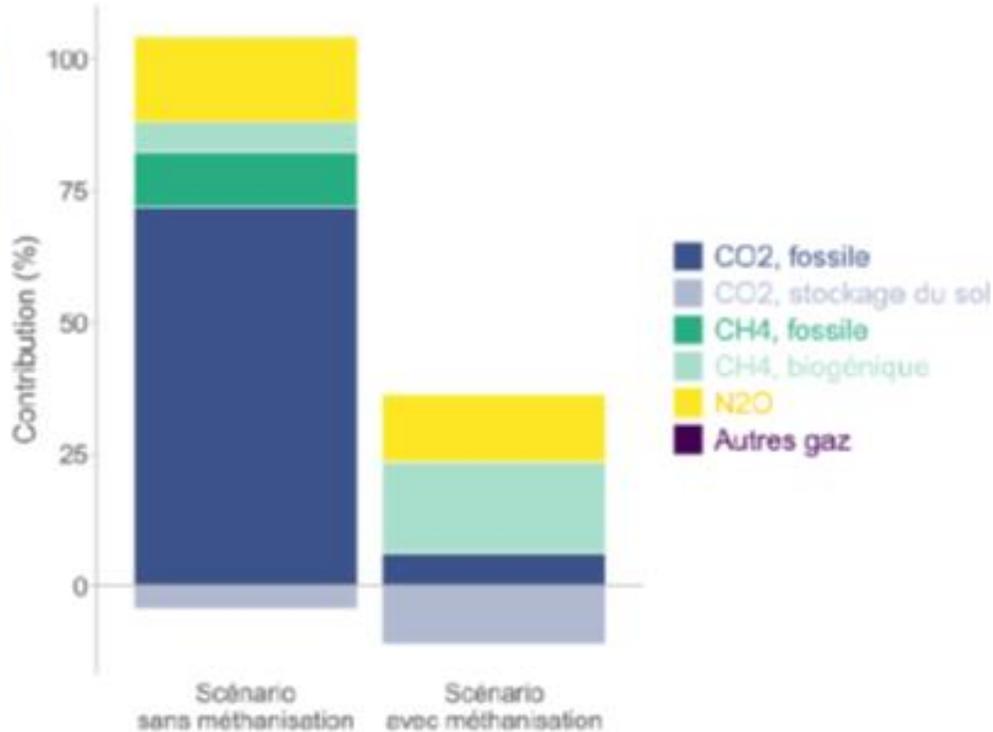
Production de méthane à partir de matières organiques, principalement du bois, par un processus thermochimique

POWER-TO-GAS

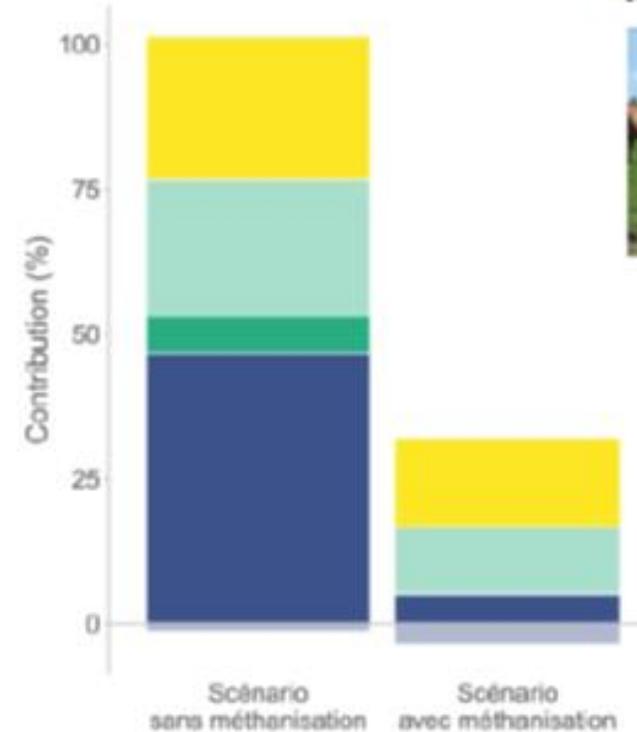
Production de méthane par électrolyse de l'eau en utilisant de l'électricité renouvelable et méthanation de l'hydrogène produit, en présence de dioxyde de carbone

A priori beaucoup de littérature

« Culture »



« Elevage »



➤ ACVs pour la méthanisation, la pyro-gazéification et le power-to-gas

(ADEME, 2018)

MÉTHANISATION

Production de méthane en utilisant des micro-organismes qui dégradent la matière organique

PYRO-GAZÉIFICATION

Production de méthane à partir de matières organiques, principalement du bois, par un processus thermo-chimique

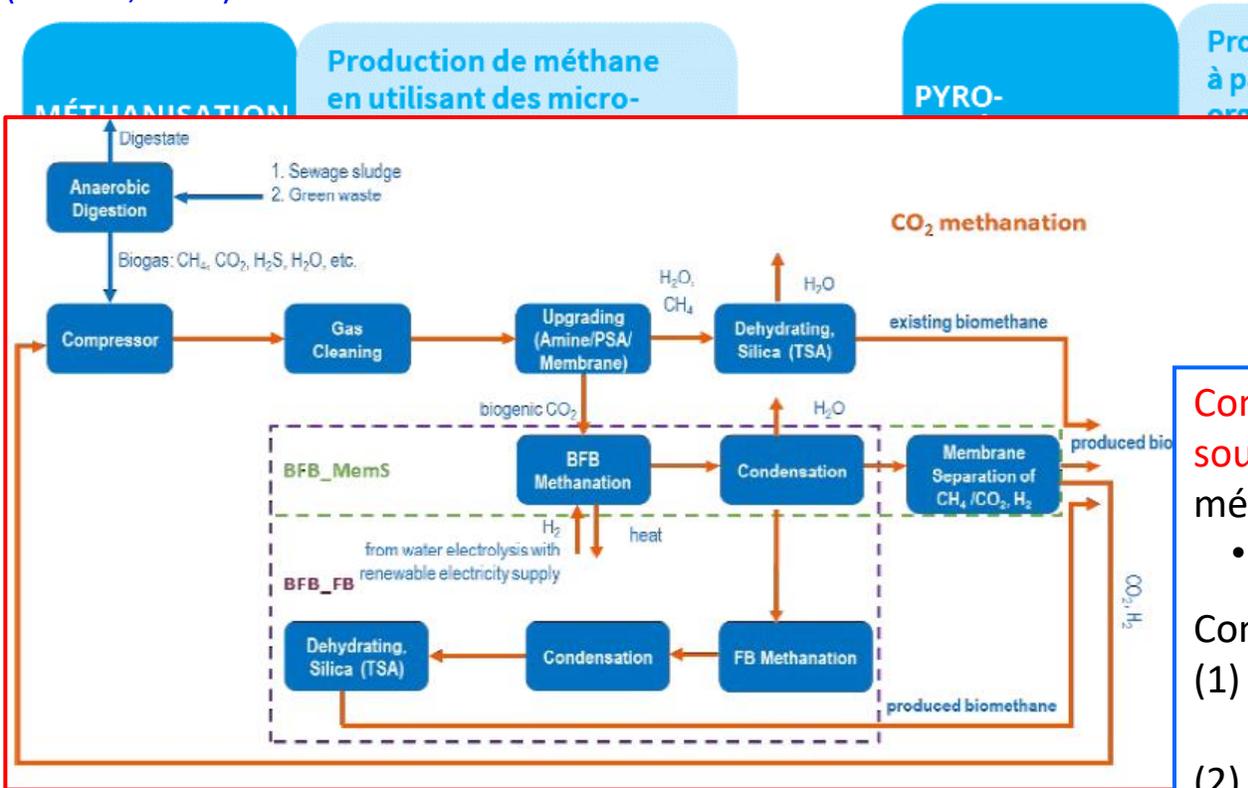
Très peu de littérature

POWER-TO-GAS

Production de méthane par électrolyse de l'eau en utilisant de l'électricité renouvelable et méthanation de l'hydrogène produit, en présence de dioxyde de carbone

➤ ACVs pour la méthanisation, la pyro-gazéification et le power-to-gas

(ADEME, 2018)



Production de méthane à partir de matières organiques, principalement bois, par un processus pyrochimique

POWER-TO-GAS
Production de méthane par électrolyse de l'eau en utilisant de l'électricité renouvelable et méthanation de l'hydrogène produit, en présence de dioxyde de carbone

A priori beaucoup de littérature

Convertir les excédents temporaires de production d'électricité renouvelable sous forme de H₂, lui-même convertible en présence de CO₂ en CH₄ par méthanation (*a priori* voie hydrogénotrophe de la méthanisation).

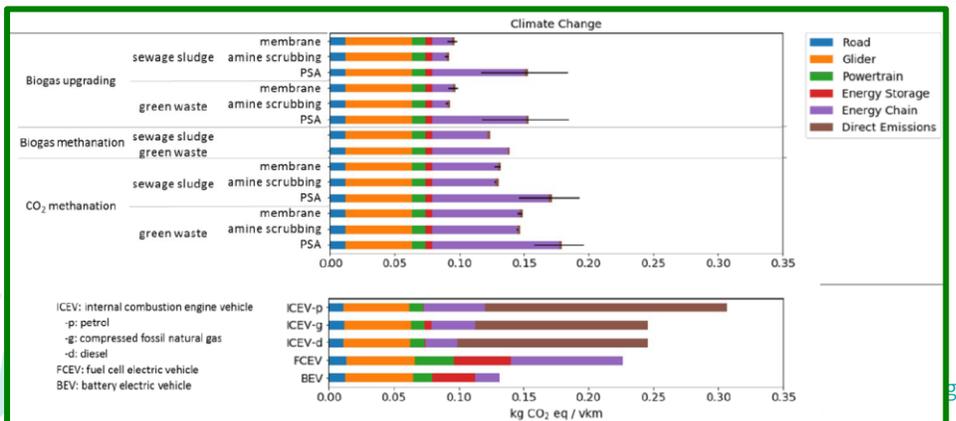
- CO₂ potentiellement issu du biogaz ... ou d'ailleurs.

Comparaisons :

- (1) filière biométhane, filière avec méthanation du CO₂ et filière méthanation du biogaz ;
- (2) pour alimentation de véhicules (GNV, essence, diesel, H₂ ou électrique).

L'utilisation du biométhane comme carburant produit par les systèmes étudiés pourrait permettre de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 27 à 62 % par rapport aux véhicules classiques fonctionnant au gaz naturel, ou de 41 à 70 % par rapport aux véhicules à essence.

(Zhang et al., 2020)



➤ Références « Energies renouvelables et biodiversité » : 1.

- ADEME. 2018. Un mix de gaz 100% renouvelable en 2050 ? Synthèse de l'étude. ADEME, GRDF, GRTgaz. 22 p. (<https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/1548-mix-de-gaz-100-renouvelable-en-2050--9791029710476.html>)
- Bas A. Dieckhoff L. 2021. La compensation écologique pour les projets éoliens terrestres et photovoltaïques au sol en France et en Allemagne. Note de synthèse (mai 2021). Office franco-allemand pour la transition énergétique. 42 p. (<https://energie-fr.de.eu/files/ofaenr/04-notes-de-synthese/02-acces-libre/06-societe-environnement-economie/2021/OFATE EIFER Synthese Compensation Ecologique 2104.pdf>)
- Bennun, L., van Bochove, J., Ng, C., Samper, C., Rainey, H., & Rosenbaum, H. C. (2021). Mitigating biodiversity impacts associated with solar and wind energy development: Guidelines for project developers. Gland, Switzerland: IUCN and Cambridge, UK: The Biodiversity Consultancy. 260 p. (<https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2021.04.en>)
- Bernet N., Girault R. 2023. Point sur les recherches actuelles sur la méthanisation à INRAE. Journée d'échange OFB-INRAE (22/06/2023). Exposé oral. ([mail](mailto:))
- Bourgeteau-Sadet S. 2023. Metha-BioSol: Impact des digestats sur la qualité microbiologique des sols Un effet dépendant de la nature du digestat et du type de sol. Journée d'échange OFB-INRAE (22/06/2023). Exposé oral. ([mail](mailto:))
- Bukhary S., Ahmad S., Batista J. 2018. Analyzing land and water requirements for solar deployment in the Southwestern United States. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82, 3288-3305. (<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.016>)
- Calidris, Energii solutions. 2019. Photovoltaïque et biodiversité – Etude bibliographique et retour d'expérience. Calidris Expertises Environnementales. 23 p. (<https://www.morbihan.gouv.fr/contenu/telechargement/45435/327126/file/Photovolta%c3%afque+et+Biodiversit%c3%a9+biblio+CALIDRIS.pdf>)
- Carlisle, Juliet E., et al. "Utility-scale solar and public attitudes toward siting: A critical examination of proximity." Land Use Policy 58 (2016): 491-501. (<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.08.006>)

➤ Références « Energies renouvelables et biodiversité » : 2.

- Cromratie Clemons S.K., Salloum C.R., Herdegen K.G., Kamens R.M., Gheewala S.H. 2021. Life cycle assessment of a floating photovoltaic system and feasibility for application in Thailand. *Renewable Energy* 168, 448-462. (<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.082>)
- De Marco, A., Petrosillo, I., Semeraro, T., Pasimeni, M. R., Aretano, R., & Zurlini, G. (2014). The contribution of Utility-Scale Solar Energy to the global climate regulation and its effects on local ecosystem services. *Global Ecology and Conservation*, 2, 324-337. (<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2014.10.010>)
- Fritz, B., Horváth, G., Hünig, R., Pereszlényi, Á., Egri, Á., Guttman, M., Schneider, M., Lemmer, U., Kriska, G. and Gomard, G., 2020. Bioreplicated coatings for photovoltaic solar panels nearly eliminate light pollution that harms polarotactic insects. *Plos one*, 15(12), p.e0243296. (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243296>)
- Hernandez, R. R., Hoffacker, M. K., Murphy-Mariscal, M. L., Wu, G. C., & Allen, M. F. (2015). Solar energy development impacts on land cover change and protected areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(44), 13579-13584. (<https://doi.org/10.1073/pnas.1517656112>)
- Horváth, G., Blahó, M., Egri, Á., Kriska, G., Seres, I., & Robertson, B. (2010). Reducing the Maladaptive Attractiveness of Solar Panels to Polarotactic Insects : Polarized Light Pollution from Solar Panels. *Conservation Biology*, 24(6), 1644-1653. (<https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01518.x>)
- Ioannidis R., Koutsoyiannis D. 2020. A review of land use, visibility and public perception of renewable energy in the context of landscape impact. *Applied Energy* 276 (2020): 115367. (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115367>)
- Karimi, B., Sadet-Bourgeteau, S., Cannavacciuolo, M., Chauvin, C., Flamin, C., Haumont, A., ... & Ranjard, L. (2022). Impact of biogas digestates on soil microbiota in agriculture: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(5), 3265-3288. (<https://doi.org/10.1007/s10311-022-01451-8>)
- Launay C. 2023. Services écosystémiques et dis-services rendus par les CIVEs – Evaluation des bilans d’eau, d’azote et de carbone. Journée d’échange OFB-INRAE (22/06/2023). Exposé oral. ([mail](#))



➤ Références « Energies renouvelables et biodiversité » : 3.

- Lavigne C. 2023. Effet de la structure des paysages agricoles sur la biodiversité des arthropodes : un cadre possible pour analyser l'impact des énergies renouvelables ? Journée d'échange OFB-INRAE (22/06/2023). Exposé oral. ([mail](#))
- Loustau D. 2023. Bilan de carbone et analyse microclimatique du déboisement lié à une installation photovoltaïque en forêt des Landes. Journée d'échange OFB-INRAE (22/06/2023). Exposé oral. ([mail](#))
- LPO. 2022. Centrales photovoltaïques et biodiversité – Synthèse des connaissances sur les impacts potentiels et les moyens pour les atténuer. 73 p. (https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/2022_pv_synthese_lpo.pdf)
- Milousi, Maria, et al. "Evaluating the environmental performance of solar energy systems through a combined life cycle assessment and cost analysis." Sustainability 11.9 (2019): 2539. (<https://doi.org/10.3390/su11092539>)
- Moinard, V., Redondi, C., Etievant, V., Savoie, A., Duchene, D., Pelosi, C., Houot S., Capowiez, Y. (2021). Short-and long-term impacts of anaerobic digestate spreading on earthworms in cropped soils. Applied Soil Ecology, 168, 104149. (<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104149>)
- Moore-O'Leary, K. A., Hernandez, R. R., Johnston, D. S., Abella, S. R., Tanner, K. E., Swanson, A. C., ... & Lovich, J. E. (2017). Sustainability of utility-scale solar energy—critical ecological concepts. Frontiers in Ecology and the Environment, 15(7), 385-394. (<https://doi.org/10.1002/fee.1517>)
- Niang M.D., Goffaux R. 2022. Synthèse bibliographique – État de l'art des connaissances sur les incidences des infrastructures de production d'énergie renouvelable sur la Biodiversité. Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité (FRB). 121 p. (https://www.fondationbiodiversite.fr/wp-content/uploads/2022/06/FRB_Synthese_biblio_EnR_et_biodiversite.pdf)
- Payet J., Evon B., Sié M., Blanc I., Beloin-Saint-Pierre D., Guermont C., Adra N., Raison E., Puech C., Durand Y. 2014. Référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'analyse du cycle de vie. Ademe. 68 p. (https://www.ekoconception.eu/fichiers_communs/Ref-Methodologique-PV-FR.pdf)



➤ Références « Energies renouvelables et biodiversité » : 4.

- Porcher E., Fontaine C. 2019. Paysages, pollinisateurs et niveaux de pollinisation. Paysage, biodiversité fonctionnelle et santé des plantes. MNHN. 20 p. (<https://hal-mnhn.archives-ouvertes.fr/mnhn-02915524/document>)
- Shruti Khadka Mishra, Minjia Zhu, Richard L Bernknopf and Leeroy J Walston . 2023. Valuation of pollination services from habitat management: A case study of utility scale solar energy facilities in the United States. Environmental Research Communications. 12 p. (<https://doi.org/10.1088/2515-7620/acda7f>)
- Taylor, R., Conway, J., Gabb, O. and Gillespie, J., 2019. Potential ecological impacts of ground-mounted photovoltaic solar panels. Online] Accessed. (<https://www.agrisolarclearinghouse.org/wp-content/uploads/2022/02/Taylor-et-al-2019.pdf>)
- Walston L.J., Mishra S.K., Hartmann H.M., Hlohowskyj I., McCall J., Macknick J. 2018. Examining the potential for agricultural benefits from pollinator habitat at solar facilities in the United States. Environmental science & technology 52.13, 7566-7576. (<https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00020>)
- Walston, L. J., Rollins, K. E., LaGory, K. E., Smith, K. P., & Meyers, S. A. (2016). A preliminary assessment of avian mortality at utility-scale solar energy facilities in the United States. Renewable Energy, 92, 405-414.(<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.041>)
- Zhang, X., Witte, J., Schildhauer, T., & Bauer, C. (2020). Life cycle assessment of power-to-gas with biogas as the carbon source. Sustainable Energy & Fuels, 4(3), 1427-1436. (

Merci de votre attention



INRAE

Décarboner par la production d'énergie

06 juillet 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard, Cécile Detang-Dessendre