



HAL
open science

Décarboner par la production d'énergie.

Pierre Renault, Claire Rogel Gaillard

► **To cite this version:**

| Pierre Renault, Claire Rogel Gaillard. Décarboner par la production d'énergie.. 2023. ⟨hal-04232150⟩

HAL Id: hal-04232150

<https://hal.inrae.fr/hal-04232150v1>

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.



HAL Authorization



➤ Décarboner par la production d'énergie

Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard

➤ Plan

1. Introduction : Chiffres clés de l'énergie – Coûts et rendements à l'hectare des énergies renouvelables -Stratégie(s) de décarbonation
2. Bois-énergie, méthanisation, agri-photovoltaïsme, (éolien « agricole » , biocarburants)
3. Conclusions et questions

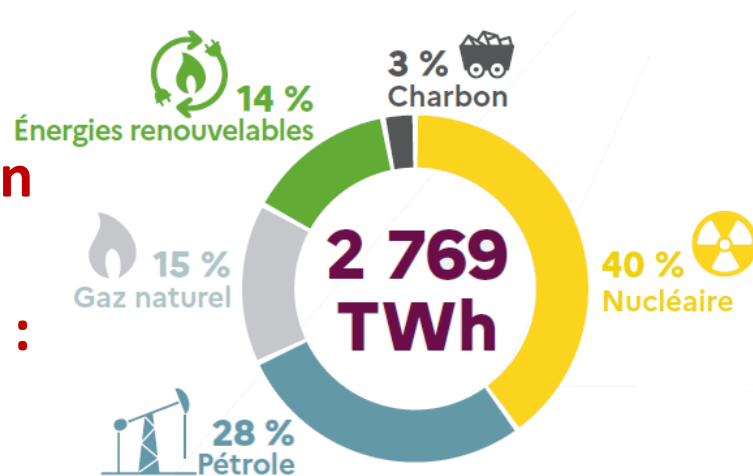
Introduction :

Chiffres clés de l'énergie – Coûts et rendements à l'hectare des énergies renouvelables – Stratégie(s) de décarbonation



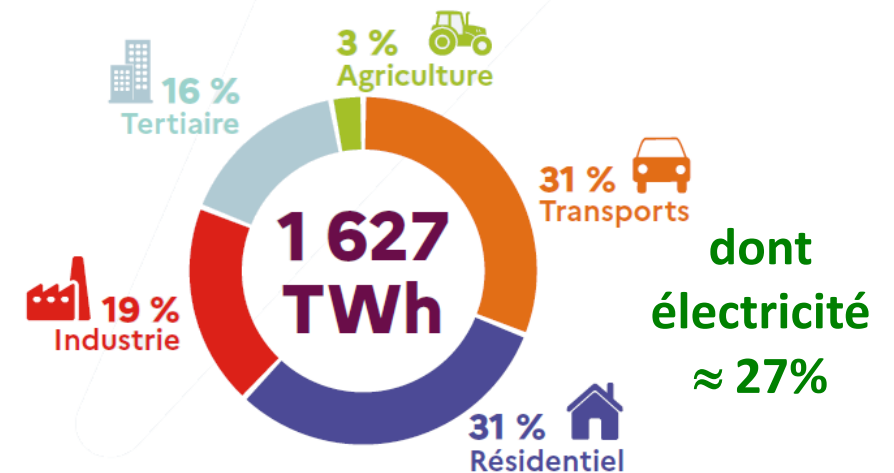
➤ Besoins énergétiques en France en 2021

Consommation d'énergie primaire 2021 :



Une déperdition d'énergie principalement liée à la perte de chaleur lors de la production d'électricité

Consommation finale énergétique 2021 :

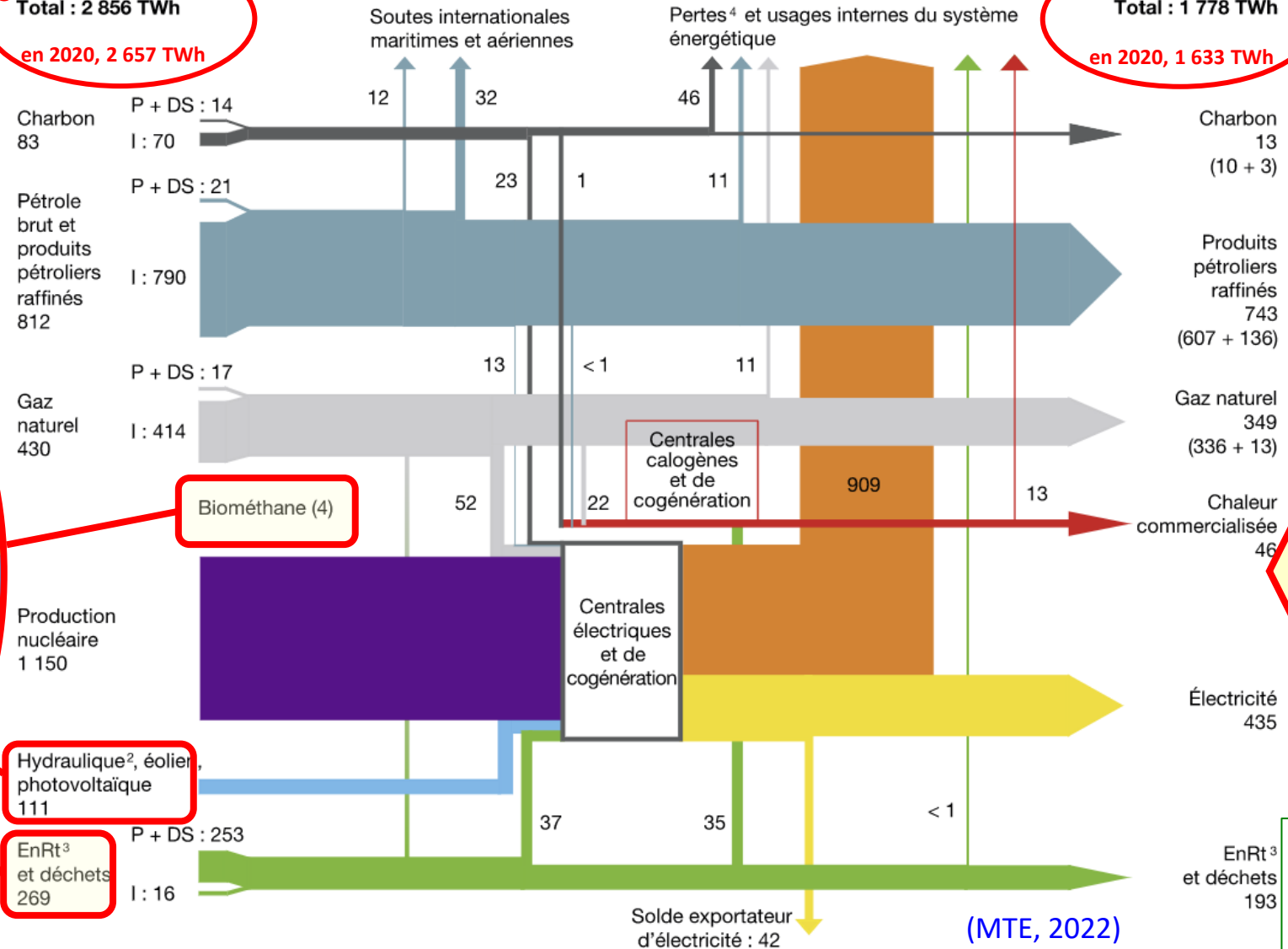


➤ Energies renouvelables (EnR) dans le mix énergétique en 2021

En TWh, en 2021 (données non corrigées des variations climatiques)

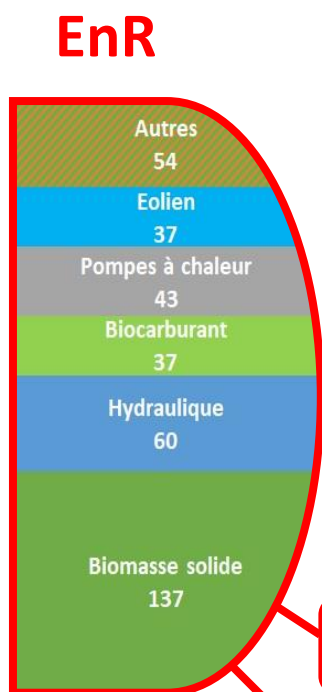
Ressources primaires
Total : 2 856 TWh
en 2020, 2 657 TWh

Consommation finale⁵
Total : 1 778 TWh
en 2020, 1 633 TWh



Leur ôter les exportations d'électricité ainsi que les soutes maritimes et aériennes internationales

Leur soustraire les usages non énergétiques du charbon, des produits pétroliers raffinés et du gaz naturel (cf. décomposition entre usages énergétiques et non énergétiques dans les parenthèses)



En France :
EnR = 345 TWh
(biomasse ≈ 53% des EnR)

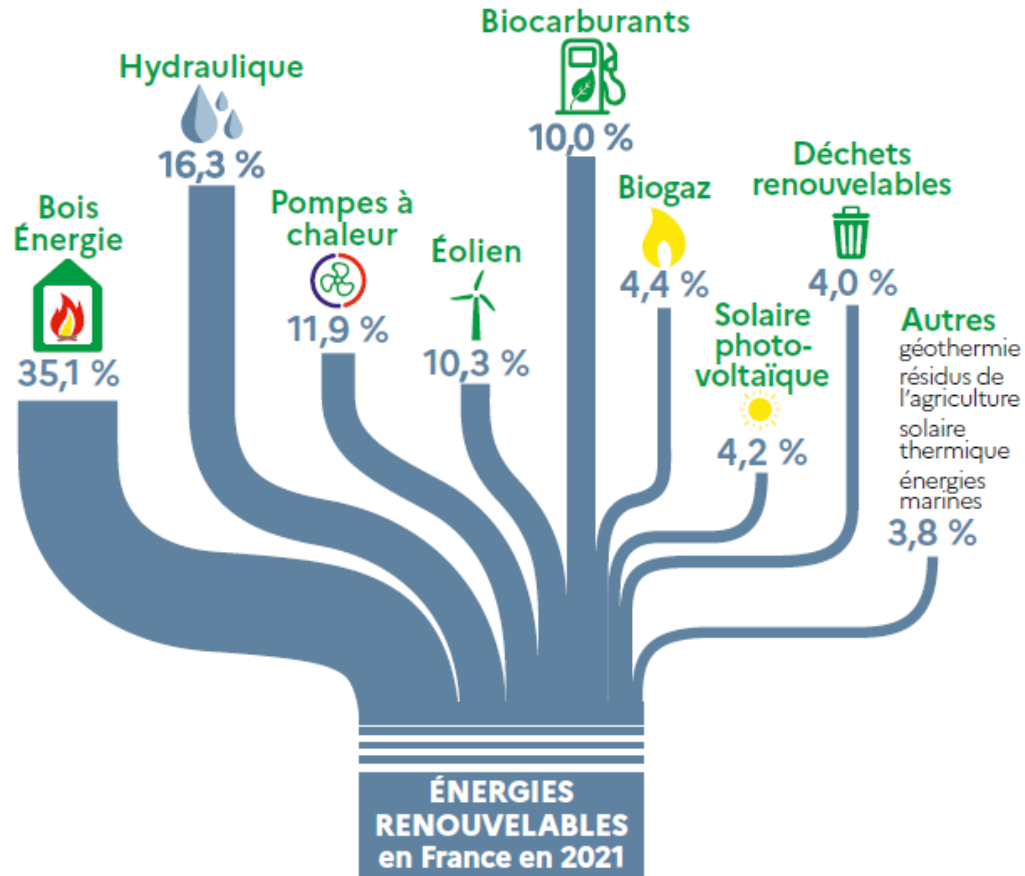
SNBC pour 2050 :
mobilisation de biomasse ~ 400-450 TWh (DGEC, 2020)
Difficile à atteindre ??

Max (bois-énergie) < 160 TWh
Possibilité méthanisation x 14 ?
(x 2 env? dans le sc. SNBC-3 à év.)

(MTE, 2022)

➤ Parts relatives des différentes EnR

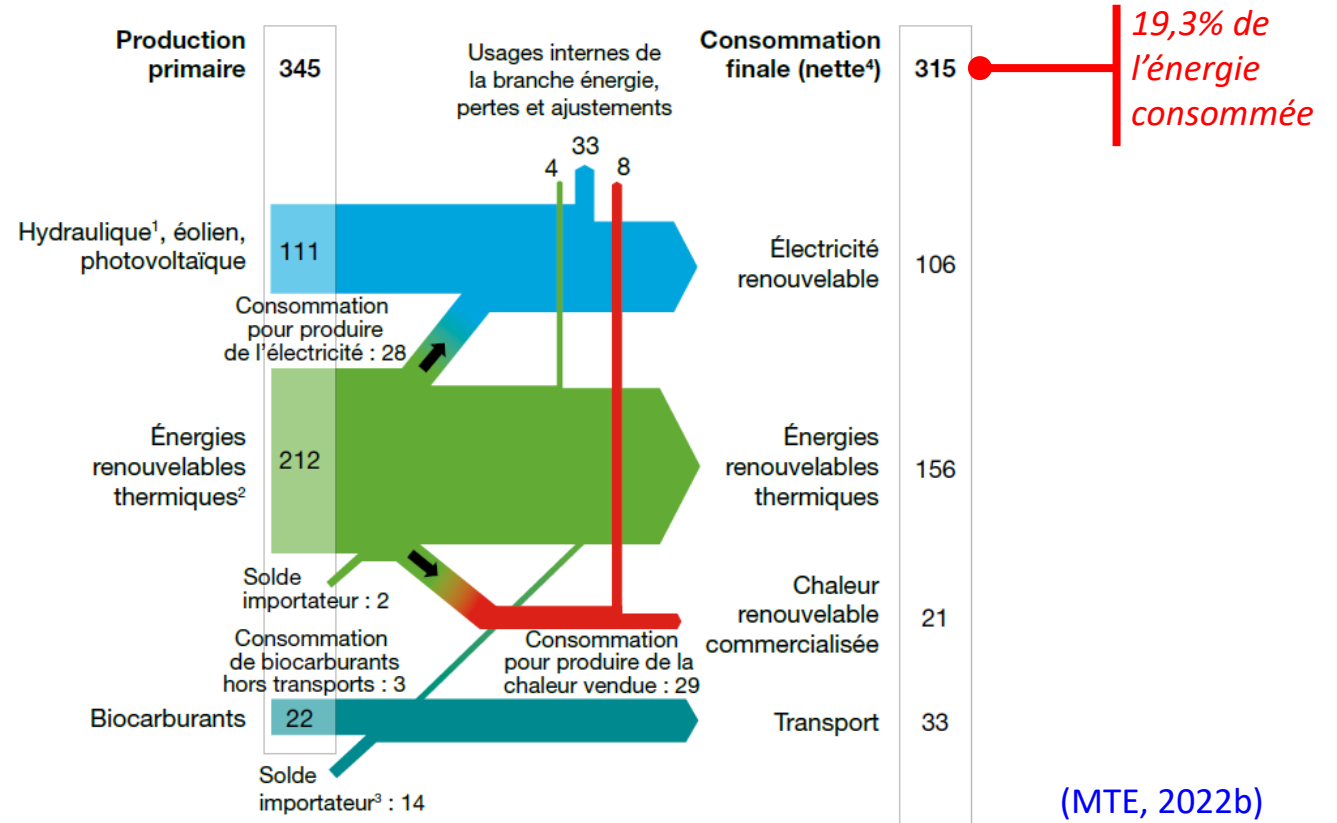
Consommation d'énergie primaire renouvelable en 2021 :



(MTE, 2022b)

Consommation primaire vs finale d'EnR : (déperdition principalement liée à la conversion de bois en électricité)

En TWh



¹ Y compris énergies marines, hors accumulation par pompage.

² Hors biocarburants.

³ Importations - exportations.

⁴ Nette de l'énergie consommée par la branche énergie pour ses usages propres et des pertes de transformation, de transport et de distribution.

Source : calculs SDES



INRAE

Décarboner par la production d'énergie

12-13 janvier 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard

➤ Coûts approximatifs des EnR

Deux sources à prendre « à la louche » :

	Financing rate (%)	Capital costs (\$/kW)			Capacity factor (%)			Fuel, CO ₂ and O&M (\$/MWh)			LCOE (\$/MWh)		
		All	2020	2030	2050	2020	2030	2050	2020	2030	2050	2020	2030
European Union													
Nuclear	8.0	6 600	5 100	4 500	75	75	70	35	35	35	150	120	115
Coal	8.0	2 000	2 000	2 000	20	n.a.	n.a.	120	205	275	250	n.a.	n.a.
Gas CCGT	8.0	1 000	1 000	1 000	40	20	n.a.	65	95	120	100	150	n.a.
Solar PV	3.2	790	460	340	13	14	14	10	10	10	55	35	25
Wind onshore	3.2	1 540	1 420	1 300	29	30	31	15	15	15	55	45	40
Wind offshore	4.0	3 600	2 020	1 420	51	56	59	15	10	5	75	40	25

(Bhutada, 2022)

Cour des Comptes (2021) et ADEME (2021e) plus proches des estimations de l'IEA (2021)

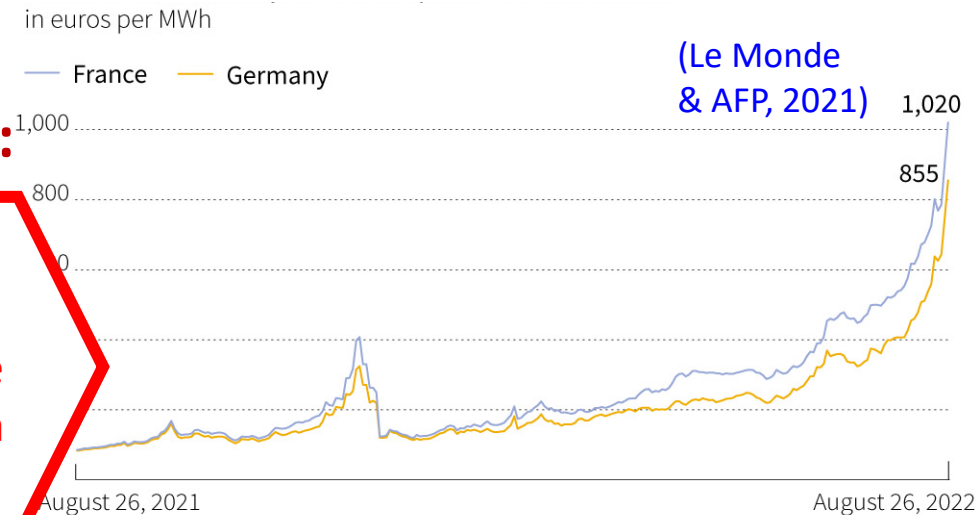
LCOE = levelised cost of electricity (IEA, 2021)
CCGT = combined-cycle gas turbine

Des prix qui deviennent compétitifs avec la crise :



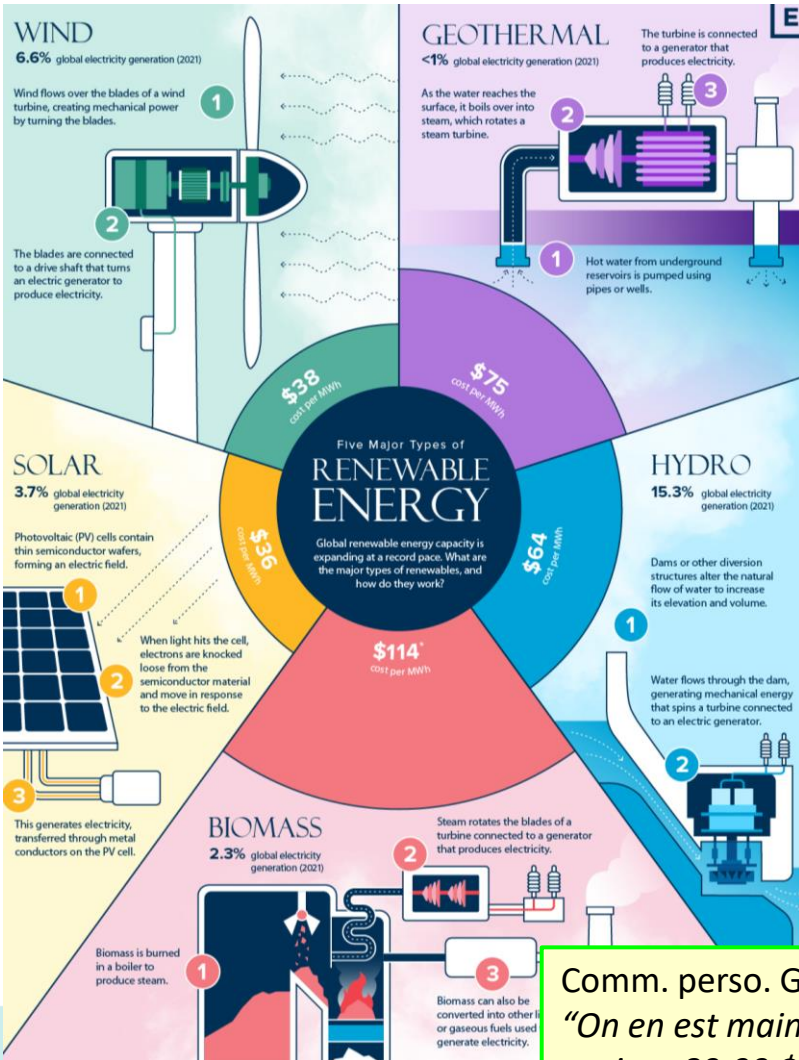
EPR de Flamanville : 19,1 Md€ ~ 1650 GW soit 1,3 Md€ / TWh (de quoi équiper 19 000 ha en APV ~ 22,8 TWh)

Comm. perso. GRDF : Biomasse "On en est maintenant à plutôt à environ 80-90 \$/MWh"



*European Energy Exchange (EEX)

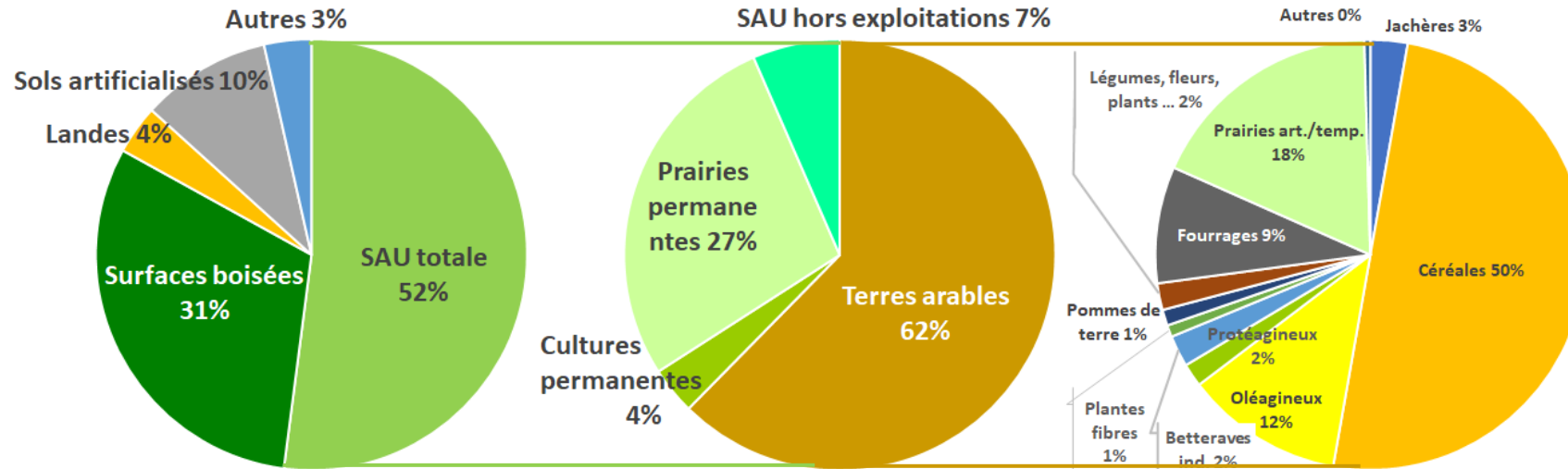
Source: Bloomberg, closing prices except for Aug 26 (1115 GMT for France), 1208 GMT for Germany



Décarboner par la production

➤ Rendements en EnR à l'hectare

Utilisation des terres en France métropolitaine en 2021 :



(Agreste, 2021)

(≥ 44% SAU pour l'élevage)

Le nucléaire en France

56 réacteurs de 900 MW (×32), 1300 MW (×20) et 1450 MW (×4) ([lien](#))

~ 530 TWh (si tous fonctionnaient !)

Pour la moitié en service ~ 265 TWh

Le potentiel de l'agrivoltaïsme

1 000 ha équipés ~ 1GWc ~ 1,2 TWh
(variable, [lien](#))

50 000 ha équipés ~ 58 TWh

(~ 1% des surfaces artificialisées,
~ 0,6% des surfaces en céréales)

Surfaces destinées à la production de biocarburants

Ressource	SAU brute (ha)	SAU nette (ha)
Maïs	44 896	39 957
Blé	42 912	36 046
Betteraves	144 938	94 210
Colza	729 012	466 568
Tournesol	83 466	53 418

0.9

(Mourjane et Fosse, 2021)

Bois buche : (25 Mm³) 35,8% des EnR, 66% de chaleur R (93 TWh), 2,5% d'électricité R (2,7 TWh)

(ser et France Bois Forêt, 2021)

Agriculture : 25% des EnR, 96% des biocarburants, 26% du biogaz, 13% du photovoltaïque, 83% de l'éolien

(Courteau et Fugit, 2020)

Rendement énergie

Betterave ([lien](#)) :
~ 9000 l.ha⁻¹
~ 4,6 tep .ha⁻¹
~ 54 MWh .ha⁻¹
1000 ha ~ 54 GWh

INRAE

Décarboner par la production d'énergie

12-13 janvier 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard

➤ Stratégie(s) a priori possible(s)

Réduire la demande énergétique

+

Réduire l'écart entre consommation d'énergie primaire et consommation finale énergétique

+

Substituer des EnR aux énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel)

Volontariat (22°C → 19°C)

Réduction des pertes

Mieux valoriser la chaleur cogénérée avec l'électricité

Des EnR « sans C » : Éolien, agri-photo-voltaïsme ...

Des EnR avec de la M.O. renouvelable : Bois-énergie, méthanisation ...

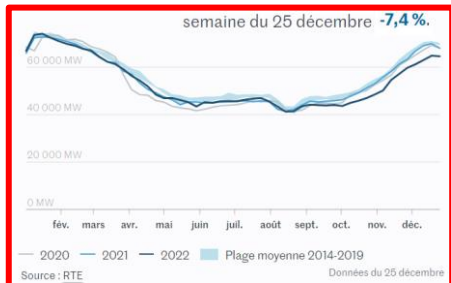
Isolation des bâtiments, moyens de transports économes



La chaleur de la centrale de Tricastin en partie récupérée pour chauffer l'eau de la ferme aux crocodiles (Meyer, 2022).

Divers scénarios proposés / à l'étude :

- Scénario pour la SNBC-3 ;
- Scénarios négaWatt2022 (nW, 2022) et Afterres2050 (Solagro et al., 2016) ;
- Les 4 scénarios Transition(s) 2050 de l'ADEME (ADEME, 2021a-d).



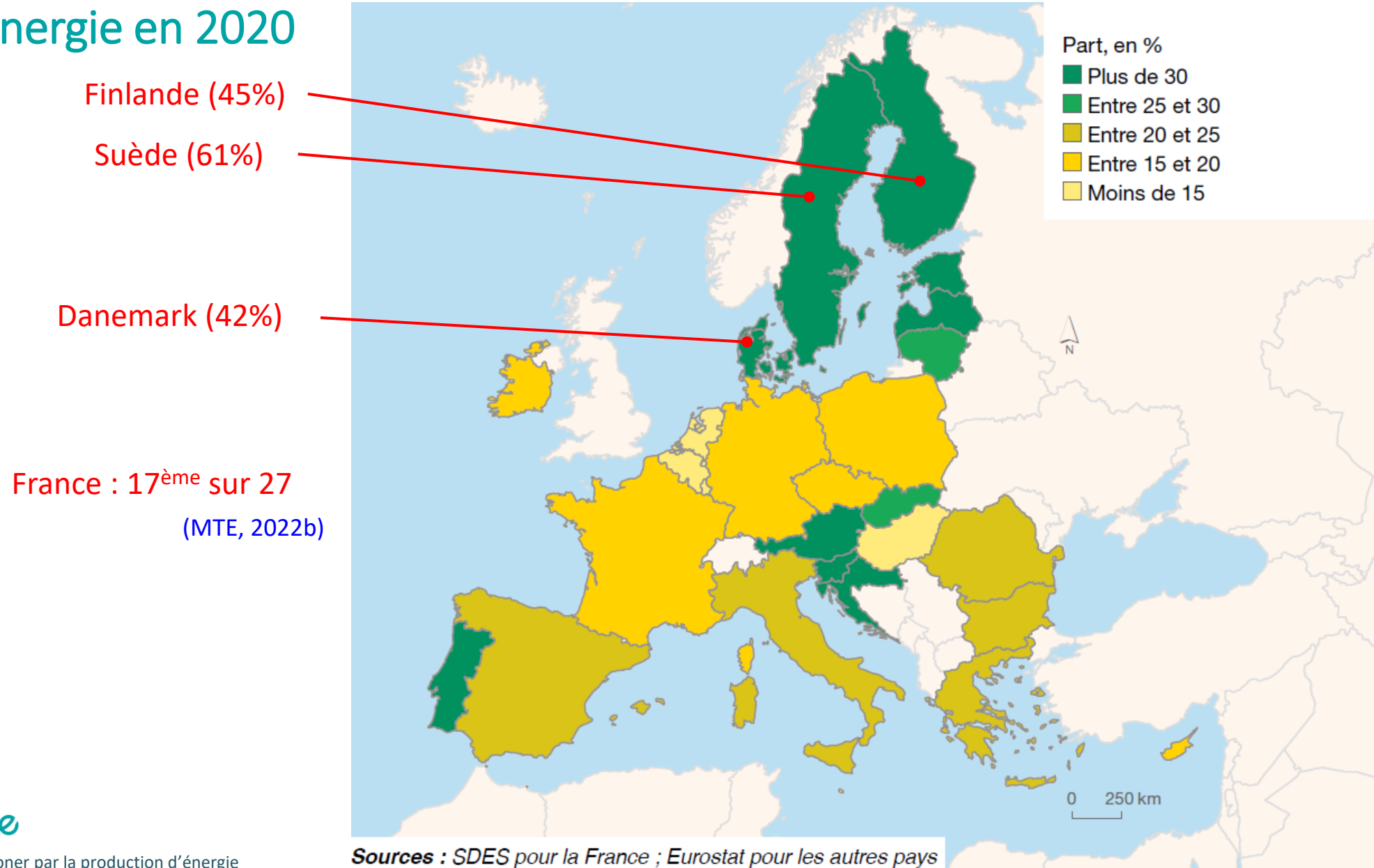
Cons. d'électricité corrigée des effets météorologiques (Le Monde & AFP, 2022)

INRAE

Décarboner par la production d'énergie

12-13 janvier 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard

➤ Part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie en 2020



Sources : SDES pour la France ; Eurostat pour les autres pays



INRAE

Décarboner par la production d'énergie

12-13 janvier 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard

(MTE, 2022b)

➤ Références « chiffres clés de l'énergie » : 1.

ADEME. 2021a. Transition(s) 2050 (<https://transitions2050.ademe.fr/>)

ADEME. 2021b. Transition(s) 2050 ; Choisir maintenant ; Agir pour le climat ; 4 scénarios pour atteindre la neutralité carbone – Rapport. (<https://librairie.ademe.fr/cadic/6531/transitions2050-rapport-compresse.pdf?modal=false>)

ADEME. 2021c. Transition(s) 2050 ; Choisir maintenant ; Agir pour le climat – Synthèse. (<https://librairie.ademe.fr/cadic/6529/transitions2050-synthese.pdf?modal=false>)

ADEME. 2021d. Transition(s) 2050 ; Choisir maintenant ; Agir pour le climat – Résumé exécutif. (<https://librairie.ademe.fr/cadic/6527/transitions2050-resume-executif.pdf?modal=false>)

ADEME. 2021e. Caractériser les projets photovoltaïques sur terrains agricoles et l'agrivoltaïsme – Etat de l'art bibliographique (Sept. 2021). 141 p. (<https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/4992-caracteriser-les-projets-photovoltaiques-sur-terrains-agricoles-et-l-agrivoltaisme.html>)

Agreste. 2021. Chiffres & données ; statistiques Agricole annuelle 2020 – Chiffres provisoires (mai 2021, n°7). 62 p. (https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Chd2107/cd%202021-7_SAA%202020%20Provisoire.pdf)

Bhutada G. 2022. What Are the Five Major Types of Renewable Energy? Visual Capitalist (Published on June 9, 2022). (<https://www.visualcapitalist.com/what-are-the-five-major-types-of-renewable-energy/> consulté le 30/12/2022)
(<https://ednh.news/europe-electricity-prices-soar-as-tough-winter-looms/> consulté le 30/12/2022)

Cour des Comptes. 2021. L'analyse des coûts du système de production électrique en France – Observations définitives ((Article R. 143-11 du code des juridictions financières) (S2021-2052, 2^{ème} Chambre, 3^{ème} Section). 104 p. (<https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/2021-12/20211213-S2021-2052-analyse-couts-systeme-production-electrique-France.pdf>)

Cour des Comptes. 2022. La filière EPR – Rapport public thématique. 148 p. (<https://www.ccomptes.fr/system/files/2020-08/20200709-rapport-filiere-EPR.pdf>)

DGEC. 2020. Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat. 47 p. (<https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Synth%C3%A8se%20sc%C3%A9nario%20de%20r%C3%A9f%C3%A9rence%20NBC-RPE.pdf>)

➤ Références « chiffres clés de l'énergie » : 2.

- IEA (International Energy Agency). 2021. Net Zero by 2050 A roadmap for the global energy sector. 224 p. (<https://iea.blob.core.windows.net/assets/063ae08a-7114-4b58-a34e-39db2112d0a2/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector.pdf>).
- Le Monde, AFP. 2022. La consommation d'électricité continue de baisser en France, et avec elle les risques de coupure en début d'année. (Publié le 28 décembre 2022) (https://www.lemonde.fr/economie/article/2022/12/28/energie-la-france-consomme-toujours-moins-d-electricite_6155871_3234.html consulté le 30/12/2022).
- Meyer C., ed. sc., 2022, Dictionnaire des Sciences Animales. [On line]. Montpellier, France, Cirad. 2022. Crocodile (<http://dico-sciences-animales.cirad.fr/mobile/liste-mots.php?fiche=7836&def=crocodile> consulté le 30/12/2022)
- MTE (Ministère de la Transition Ecologique). 2021a. Chiffres clés de l'énergie ; édition 2021 (septembre 2021). 84 p. (<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2021/>).
- MTE (Ministère de la Transition Ecologique). 2022a. Chiffres clés de l'énergie ; édition 2022 (novembre 2022). 88 p. (<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2022/>).
- MTE (Ministère de la Transition Energétique). 2022b. Chiffres clés des énergies renouvelables ; édition 2022 (septembre 2022). 100 p. (<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energies-renouvelables-2022/pdf/chiffres-cles-des-energies-renouvelables-2022.pdf>).
- nW (Association négaWatt). 2022. La transition énergétique au cœur d'une transition sociétale - Synthèse du scénario négaWatt 2022. 16 p. (<https://negawatt.org/IMG/pdf/synthese-scenario-negawatt-2022.pdf>)
- Sénat. 2022. Projet de loi relatif à l'accélération de la production d'énergies renouvelables. 253 p. (<https://www.senat.fr/leg/plj21-889.pdf>)
- ser (Syndicat des énergies renouvelables), France Bois Forêt. 2021. Questions réponses ;bois-énergie. 68 p. (<https://franceboisforet.fr/wp-content/uploads/2021/05/questions-reponses-bois-energie-SER-FBF-web.pdf>)
- SolAgro, Couturier C., Charru M., Doublet S., Pointereau P. . 2016. Le scénario Afterres2050 – version 2016 . 96 p. (https://afterres2050.solagro.org/wp-content/uploads/2015/11/solagro_afterres2050_version2016.pdf)

Bois-énergie, méthanisation, biocarburants, agri-photovoltaïsme, éolien « agricole »



➤ Bois-énergie : 1. Surfaces, diversité et statut des forêts françaises (Métropole)

31% de la surface en métropole (16,9 M ha pour 2,7 Md m³) (ser et FBF, 2021) :

- 4^{ème} pays européen le plus boisé après la Suède, la Finlande et l'Espagne (ser et FBF, 2021), ou 3^{ème} en quantité derrière l'Allemagne et la Suède (Roux et al., 2020) ;
Depuis 1985, accroissement annuel (i) d'environ 80 000 ha lié pour partie à la déprise agricole (ser et FBF, 2021), et (ii) du stock sur pied / ha : ± équiv. en accroissement de biomasse (Denardou et al., 2017) ;
- **Guyane : 8 M ha en forêt (> 96% de sa superficie)** (ser et FBF, 2021) ;

Biodiversité :

- 146 essences d'arbres, dont 4 représentent 50% du bois sur pied (IGN d'après Cour des Comptes (2020)), ou 190 (IGN, 2021) ;
- 72% en feuillus dominants, **28% en résineux dominants** (ser et FBF, 2021), ou 67% en feuillus, 12% en mixtes et **21% en résineux** (Cour des Comptes, 2020) ;
- Stocks : 64% de feuillus (chêne, hêtre, châtaigner ...) et 36% de résineux (sapin, épicéa, pin sylvestre, pin maritime ...) (IGN d'après Cour des Comptes, 2020) ;

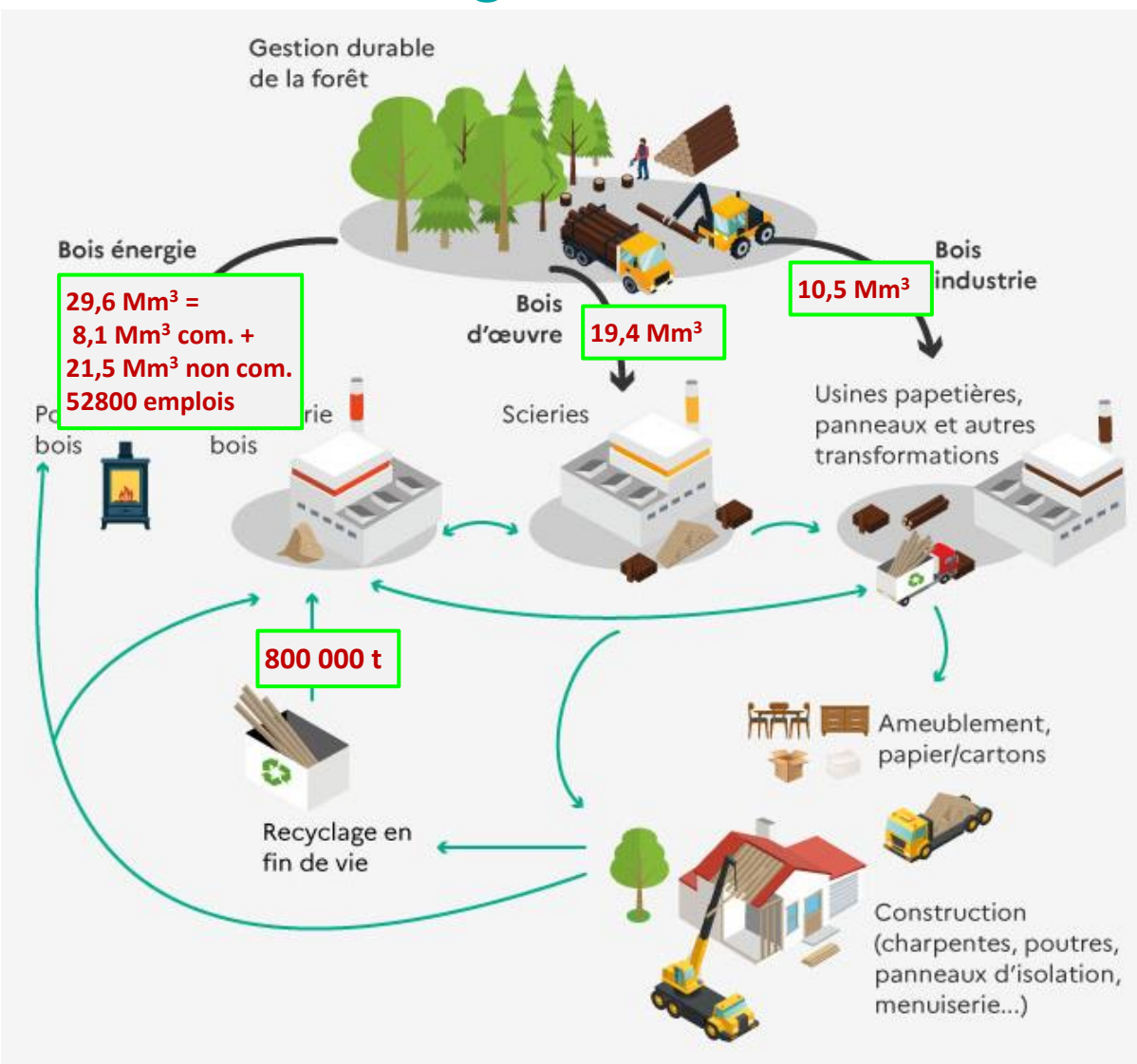
Types de Propriétés :

- **Publique : 25%** avec Etat : 9%, et collectivités locales et établissements publics : 16% ;
- **Privées : 75%** (avec **3,3 M de propriétaires privés** (ser et FBF, 2021), ou 3,5 M dont 50 000 possédant plus de 25 ha et 2,2 M possédant moins de 1 ha (Cour des Comptes, 2021)) ;

Production annuelle de 91 M m³ (hors haies et bosquets), soit 3,4% de la biomasse sur pied ;

Capte et stocke 15% des émissions françaises de CO₂ (La Fabrique Ecologique, 2019).

➤ Bois-énergie : 2. Lié aux sous-filières bois d'œuvre et bois industrie



Le bois d'œuvre (menuiserie, ébénisterie, caisserie, emballage, etc.) : l'usage à plus forte valeur ajoutée du bois (ser-et-al-2021) ;

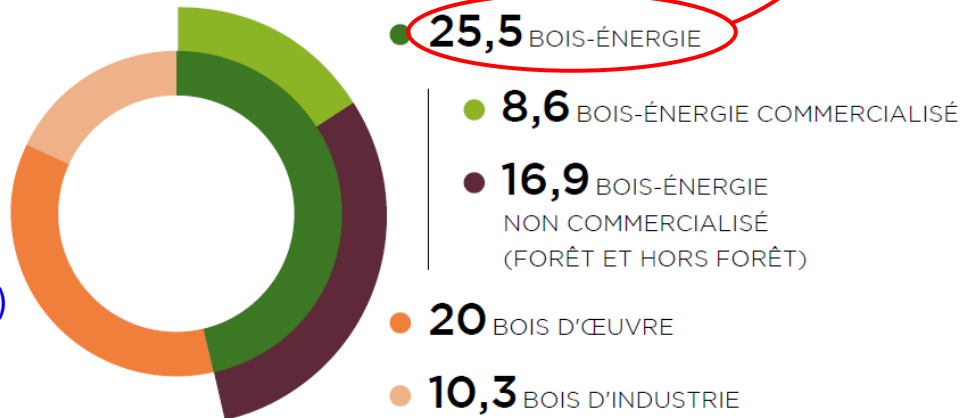
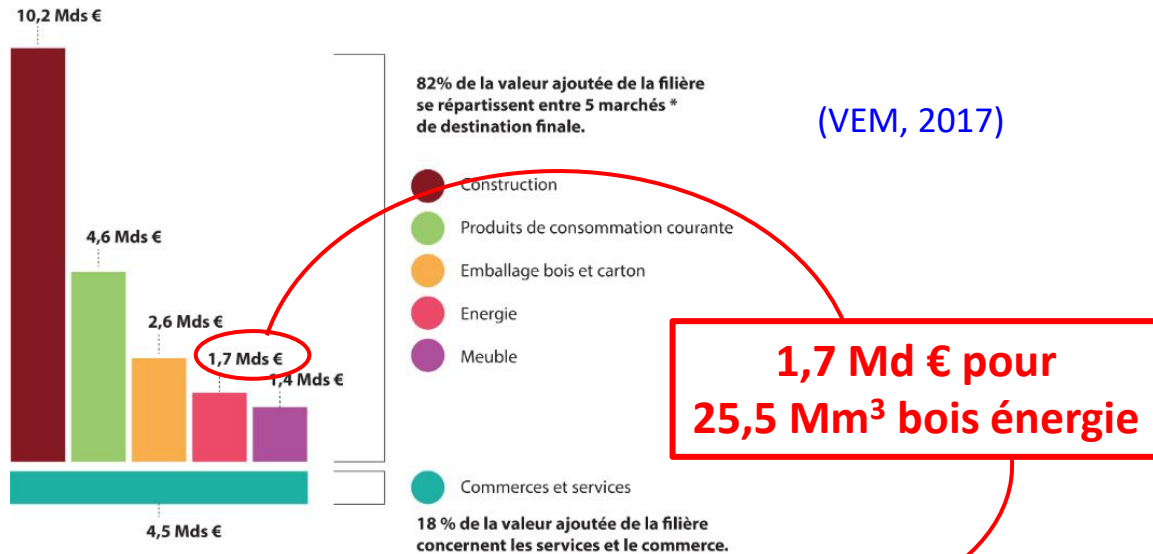
Le bois-énergie :

- Un débouché complémentaire pour valoriser (1) l'exploitation forestière (*éclaircies, ouvertures pour le passage des engins, coupes sanitaires*), (2) les produits connexes du sciage (PCS), et (3) les bois en fin de vie (ser-et-al-2021) ;
- En compétition potentielle avec (1) la sous-filière 'bois industrie', et (?) la « pyrogazéification de résidus solides ».

C'est l'augmentation de la mobilisation de bois d'œuvre qui permettra d'augmenter les volumes mobilisés en bois-énergie (ser et FBF, 2021)

➤ Bois-énergie : 3. premier contributeur aux EnR ; 2/3 non commercialisés

Un « appoint » au niveau économique
... mais source de très nombreux emplois

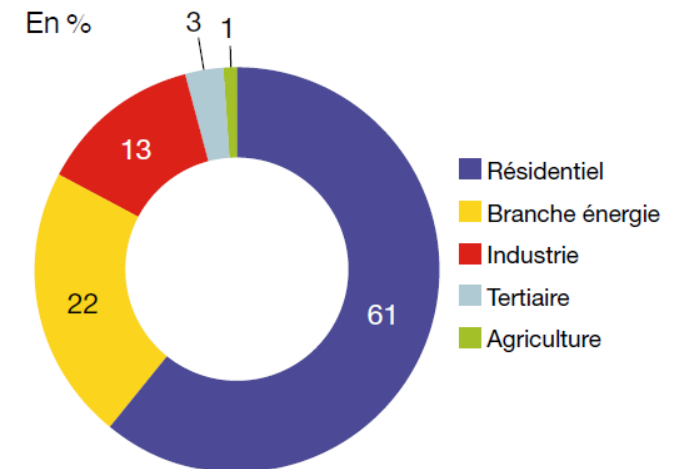


La première source d'EnR en France (CIBE et al., 2021) :

- 9,1 Mt de CO₂ évitées grâce à cela ;
- 36% de l'EnR en France ;
- 66% de la production de chaleur renouvelable ;
- 2,5% de la production d'électricité renouvelable ;
- Secteur domestique :
 - Entre 7,5 et 8 M de foyers ayant un appareil de chauffage au bois-énergie ;
 - Consomme 65% du bois-énergie.

CONSOMMATION PRIMAIRE DE BOIS-ÉNERGIE PAR SECTEUR EN 2021

TOTAL : 132 TWh (donnée réelle)



Note : le bois-énergie recouvre ici le bois, les granulés de bois et les résidus de bois (hors liqueur noire).

Source : calculs SDES

Décarboner par la production d'énergie

12-13 janvier 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard

(MTE, 2022)



➤ Bois énergie : 4. Potentiels d'accroissement de production

Production annuelle et usages :

- Si 33% de la surface est « non-exploitable » (pentes etc.) (IGN d'après Cour des Comptes, 2020) (ou XX%), 61 M m³ (ou M m³) sont potentiellement exploitables « contre » environ 51 M m³ (56%) exploités par des professionnels actuellement ;
➔ ~ 10 M m³ exploitables en plus.
- à l'horizon 2035, jusqu'à 19,8 M m³ de bois supplémentaires pourraient être mobilisés annuellement (Etude IGN/FCBA/ADEME citée par ser et FBF (2021) ;
- PNFB : mobiliser 12 Mm3 de bois en plus à l'horizon 2026 ()).

Tableau n° 1 : principaux régimes de protection des forêts françaises

Régime de protection	% surface forestière	Taux moyen de prélèvement	Impact pour l'exploitation forestière
<i>Forêts de protection</i>	1 %	ND	exploitation possible sous conditions
<i>Zones Natura 2000</i>	34 %	48 %	exploitation possible sous conditions
<i>Parcs naturels nationaux</i>	2 %	23 %	contraintes fortes en cœur de parc, limitées en zone d'adhésion
<i>Parcs naturels régionaux</i>	22 %	60 %	contraintes généralement limitées
<i>Réserves naturelles forestières</i>	0,2 %	ND (faible)	exploitation faible ou inexistante
<i>Réserves biologiques</i>	9 %	ND (faible)	exploitation faible ou inexistante

Sources : IGN, ONF, INSEE, Réserves Naturelles de France

(Cour des Comptes, 2020)



INRAE

Décarboner par la production d'énergie

12-13 janvier 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard

➤ Bois énergie : 5. Défis à-venir

En préalable : Nécessité d'une approche systémique commune aux bois d'œuvre , bois industrie et bois énergie ;

Concernant la production sur pieds :

- **Dérèglement climatique** : impacts des tempêtes et sécheresses, risques d'incendie, sensibilité aux insectes (scolytes ...) et champignons parasites ;
 - **Prévenir** : ex. obligation légale de débroussaillage (Cattelot et al., 2022) → des coupe-feu « meublés » de panneaux solaires ?
 - **S'adapter** au CC nécessite un accompagnement actif ~150 M€/an (Cattelot et al., 2022) ou 200 M€/an (Cour des Comptes, 2020) ;
 - **Gérer** les afflux extraordinaires en temps de crise : valorisation des bois dégradés (Cattelot et al., 2022) ;
- **Régénération freinée** lorsque le grand gibier est en surnombre (la moitié des forêts domaniales) **et production sur pied affectée** :
 - **Trou de production prévisible imputable à l'érosion du repeuplement** (Cour des Comptes, 2020) ;
- **Règlementation** : les documents de gestion ne concernent que la moitié des surfaces (celles > 25 ha) et ne sont réalisés qu'aux 3 quarts) ;
- **Gestion et « santé » des sols forestiers** : tassement, menu-bois récolté ou non, coupes rases ou non, reboisement passif ou actif (et alors problème de stocks de graines / plants) ;
- **Demande actuelle plus importante en bois de résineux** (surtout pour le bois d'œuvre) qu'en bois de feuillu & problème de sécurité de l'approvisionnement de la filière ;



➤ Bois énergie : 5. Défis à-venir

Concernant les filières d'exploitation :

- **Une filière fragmentée avec une gouvernance faible** : liée à 4 ministères sans que ce soit leur priorité (environnement, agriculture, industrie, construction), manque d'articulation entre l'amont et l'aval de la filière, industrie de 1^{ère} transformation insuffisamment adaptée au marché ;
- **Un déficit commercial important et croissant** en résultant en grande partie :
importations (de plus en plus de produits transformés) -exportations (beaucoup de bois brut) = 7 Md€ (largement lié au secteur de la construction, du papier carton et de l'ameublement) ;
- **Une nécessité de meilleure valorisation industrielle des essences feuillues** et/ou de qualités secondaires (Cattelot et al., 2022).
- **Label bas carbone insuffisamment mis en œuvre** (Cattelot et al., 2022) ;

Au-delà des thèmes bien couverts, des besoins en recherche avec une composante SHS importante :

- **40% de la production de bois utilisée en provenance des forêts publiques** (25% des surfaces) ;
- **Controverses autour de l'exploitation des forêts** (patrimoine, loisirs, sanctuaire menacé, durabilité des pratiques ...), situation dégradée sur le terrain avec tensions et actes de malveillance ;
- **Un dialogue forestiers – chasseurs – décideurs politiques – autres parties prenantes à favoriser.**



➤ Bois-énergie : 6. Recherches à INRAE (sur les filières bois)

- SSD & projets ECODIV, ACT, ECOSOCIO :**
- Large spectre en lien avec CC : impacts tempêtes et sécheresses, risques incendie, sensibilité insectes et champignons parasites, sélection variétale ... (EFNO, BIOGECO, BioForA ...);
 - La forêt évoquée pour SFN, interaction agriculture-forêt ... ;
 - BETA, ETTIS, CESAER, TSE, CEE-M : Assurances et risques naturels; Conflictualités/ mobilisation sociales ; approche économique ... **probablement faiblesse sur la filière bois-industrie**

MP Agriculture et forêt face au changement climatique : adaptation et atténuation - CLIMAE :

- Projet "Urban Forest : la forêt urbaine, un test d'adaptation des arbres forestiers aux changements climatiques" ;
- Projet "Modélisation de l'effet de la sélection naturelle sur la distribution des génotypes dans des gradients environnementaux" ;
- Projet "Optimisation de trajectoires de sylviculture et de choix des arbres forestiers" ;
- Thèse "Impact de la prise en compte des changements climatiques sur les terres sur le calcul de la substitution carbone par les produits forestiers" ;
- Thèse "Quels mélanges d'essences possibles pour les forêts face au changement climatique ? Approche théorique et expérimentale des propriétés écologiques" ;

TIGA Grand Nancy, des hon

(INRAE associ

PEPR FORESTS : INRAE lea

de redé

**Thèmes
probablement
peu couverts :**

1. Quantification des impacts du grand gibier (même si CEFS, EFNO) ;
2. La filière bois : dimensions économiques et sociales (SILVA

Place d'INRAE et complémentarité par rapport aux autres institutions en charge des forêts (IGN, ONF, CNPF (dont IDF), FBF, FBI, FBR(s), OFB, Ministères en charge de l'agriculture, de l'environnement, de l'aménagement du territoire, de l'industrie ..., voire Cour des Comptes, Sénat, Assemblée Nationale), et d'autres structures ayant des compétences énergie ? (ADEME, Syndicat des Energies Renouvelables ...) ???

INRAE

Décarboner par la production d'énergie

12-13 janvier 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard

➤ Références « Forêts, bois-énergie » : 1.

- Cattelot A.L., Drège P.O., Eddi M., Fournier M., Loisier A.C., Piveteau P., Rebeyrotte R., Schillinger P. 2022. Synthèse des travaux des Assises de la forêt et du bois. 186 p. (<https://agriculture.gouv.fr/telecharger/129700>)
- CIBE, Fedene, France Bois Forêt, ser, via sèva. 2021. Point Presse Digital Bois-Énergie (jeudi 4 février 2021) – Dossier de Presse. 16 p. ([https://www.fedene.fr/wp-content/uploads/sites/2/2021/03/Dossier de Presse Bois-Energie.pdf](https://www.fedene.fr/wp-content/uploads/sites/2/2021/03/Dossier_de_Presse_Bois-Energie.pdf))
- CNDB (B Comité National pour le développement du bois). 2017. Guide d'utilisation du bois. 20 p. (https://www.solfi2a.fr/media/guide_utilisation_bois_085266600_1109_22022017.pdf)
- Cour des Comptes.2020. La structuration de la filière forêt-bois, ses performances économiques et environnementales ; Communication à la commission des finances, de l'économie générale et du contrôle budgétaire de l'Assemblée nationale, Avril 2020. 151 p. (<https://www.ccomptes.fr/system/files/2020-05/20200525-rapport-58-2-structuration-filiere-foret-bois.pdf>)
- Denardou A., Hervé J.C., Dupouey J.L., Bir J., Audinot T., Bontemps J.D. 2017. L'expansion séculaire des forêts françaises est dominée par l'accroissement du stock sur pied et ne sature pas dans le temps. Revue forestière française 69(4-5), 319-340. (<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03447301/>)
- Didot F., Toppa, E. 2015. RESOFOP : réseau d'observation de la forêt privée. Forêts de France (juillet-août 2015), 14-17. (https://www.cnpf.fr/sites/socle/files/cnpf-old/510995_fdf_p14_17_resofop_1.pdf)
- FCBA (Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement – Institut technologique). 2022. Memento 2022. 48 p. (<https://www.fcba.fr/wp-content/uploads/2022/11/Memento-2022-WEB.pdf>)
- IGN. 2021. La forêt en France ! Portrait robot (publié le 8 décembre 2021). (<https://www.ign.fr/reperes/la-foret-en-france-portrait-robot> consulté le 21/12/2022).
- IGN, FCBA, ADEME. 2017. Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035. La Feuille de l'Inventaire Forestier 39 (Mars 2017), 1-15. (<https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/IF39.pdf>)

➤ Références « Forêts, bois-énergie » : 2.

La Fabrique Ecologique. 2019. Quel rôle pour la forêt dans la transition écologique en France ? Synthèse de la note. 60 p.

(<https://www.lafabriqueecologique.fr/app/uploads/2019/04/note-foret.pdf>)

MTE (Ministère de la Transition Energétique). 2022. Chiffres clés des énergies renouvelables ; édition 2022 (septembre 2022). 100 p.

(<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energies-renouvelables-2022/pdf/chiffres-cles-des-energies-renouvelables-2022.pdf>)

Roux A., Colin A., Dhôte J.F., Schmitt B. 2020. Filière forêt-bois et atténuation du changement climatique - Entre séquestration du carbone en forêt et développement de la bioéconomie. Edition QUAÉ. 173 p.

(<https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/43206/9782759231218.pdf?sequence=1>)

SER (Syndicat des énergies renouvelables), France Bois Forêt (FBF). 2021. Questions réponses ; bois-énergie. 68 p.

(<https://franceboisforet.fr/wp-content/uploads/2021/05/questions-reponses-bois-energie-SER-FBF-web.pdf>)

SER, GRDF, GRT gaz, Teréga. 2021. Panorama des gaz renouvelables en 2021. 32 p. (<https://www.grtgaz.com/sites/default/files/2022-03/Panorama-du-gaz-renouvelable-2021.pdf>)

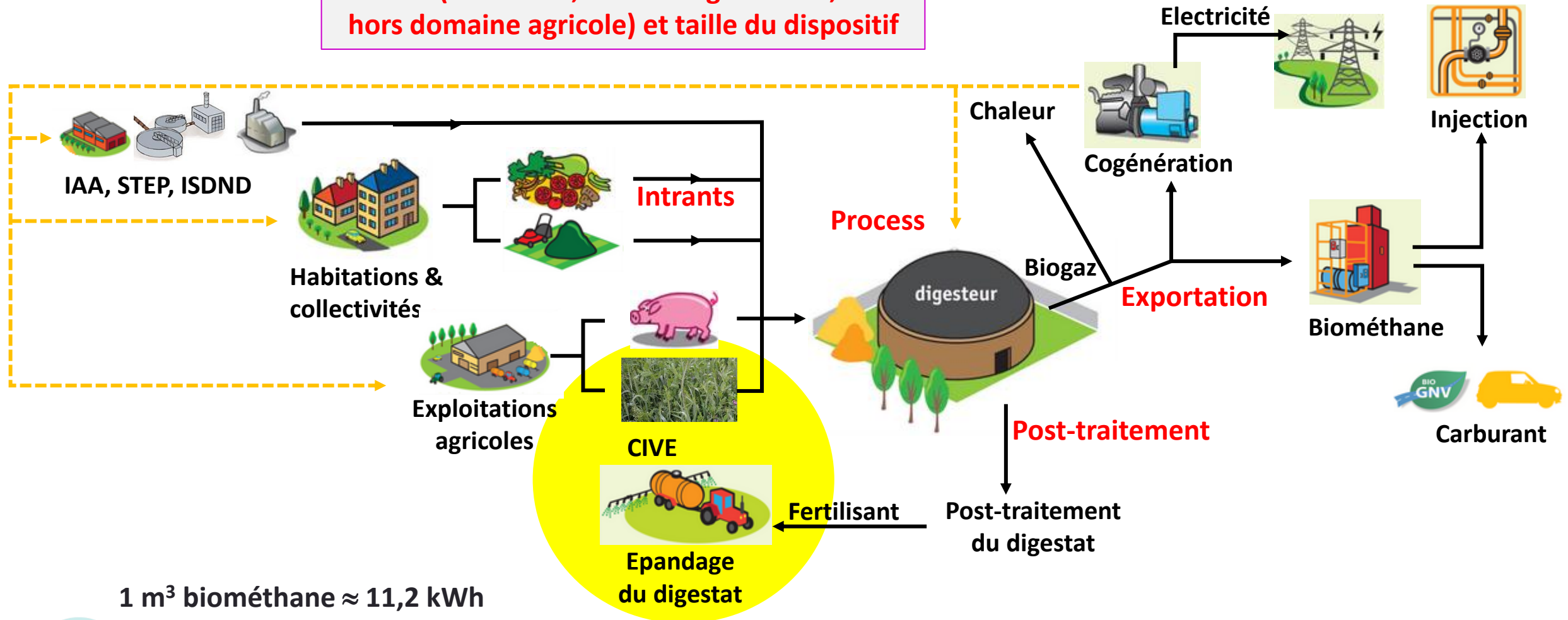
VEM (Veille économique mutualisée). 2022. Chiffres clés – Filières d’usage. (<https://vem-fb.fr/index.php/chiffres-cles/filieres-d-usage> consulté le 21/12/2022)

VEM (Veille économique mutualisée). 2017. Chiffres clés - Valeur ajoutée et emploi. (<https://vem-fb.fr/index.php/chiffres-cles/95-graphiques/137-chiffres-cles-valeur-ajoutee-et-emploi> consulté le 21/12/2022)



➤ Méthanisation : 1. Différentes configurations

Gestion (individuel, collectif agricole ou, autre hors domaine agricole) et taille du dispositif



1 m³ biométhane ≈ 11,2 kWh

INRAE

Décarboner par la production d'énergie

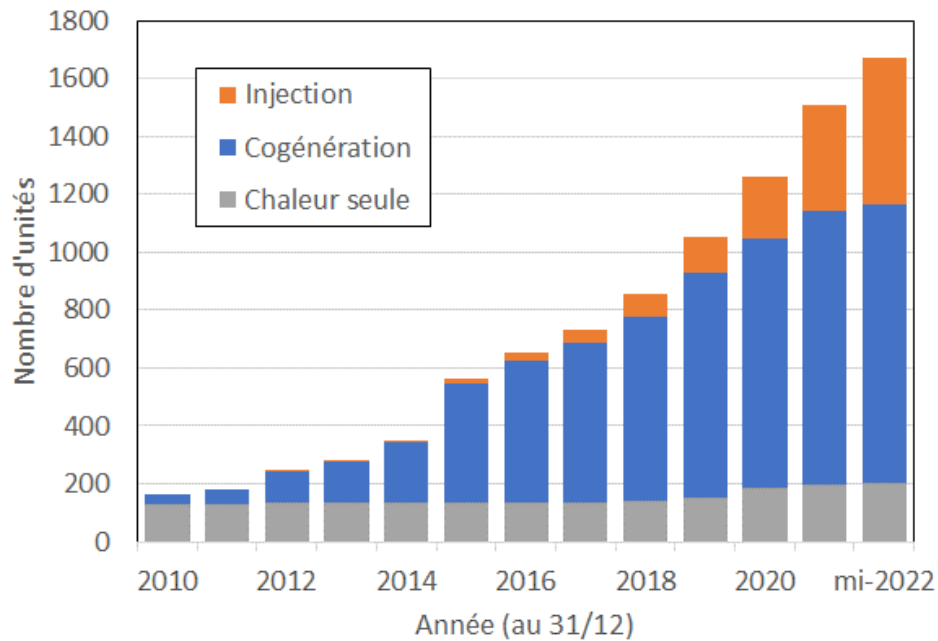
12-13 janvier 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard

(Chareyron et al., 2021 ; Carton et Bulcke, 2021 ; ADEME, 2019 ; Reibel, 2018)

➤ Méthanisation : 2. Un secteur en pleine évolution en France

Une forte croissance en France :

(Chiffres à consolider : mélanges de différentes sources 😞 : MTE, MTECT, ADEME ...)



Mi-2022 (MéthaFrance, 2022) :

• Injection :

442 installations raccordées au 30 juin 2022

7,6 TWh de parc raccordé en biométhane au 30 juin 2022

718 projets en développement* au 30 juin 2022 *qui n'injectent pas encore

3,1 TWh de production de gaz renouvelables depuis le 1^{er} janvier 2022
4,4 TWh en 2021

• Cogénération (méthanisation, STEP et ISDND) :

966 installations raccordées au 30 juin 2022

565 MW de puissance électrique installée au 30 juin 2022

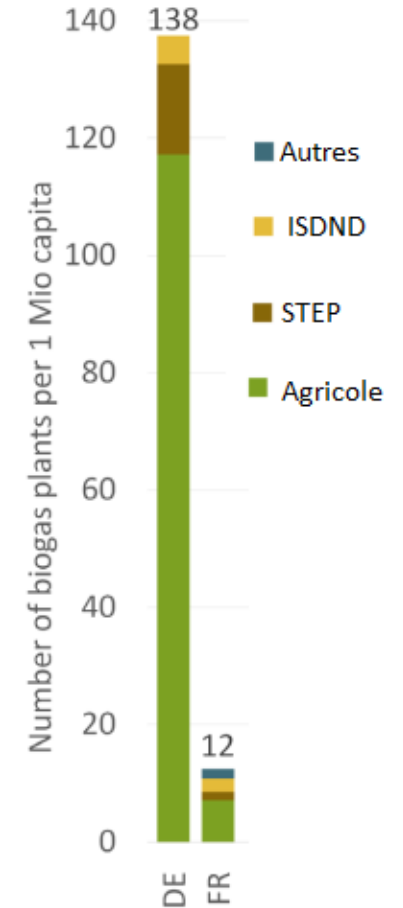
49 MW de projets en développement au 30 juin 2022

1,3 TWh d'électricité produite depuis le 1^{er} janvier 2022
2,7 TWh en 2021

• Chaleur seule (à fin 2021 !):

199 installations produisant seulement de la chaleur à fin 2021

7,9 TWh de production de chaleur renouvelable à fin 2021



... Loin derrière l'Allemagne

(InfoMETHA, 2019)

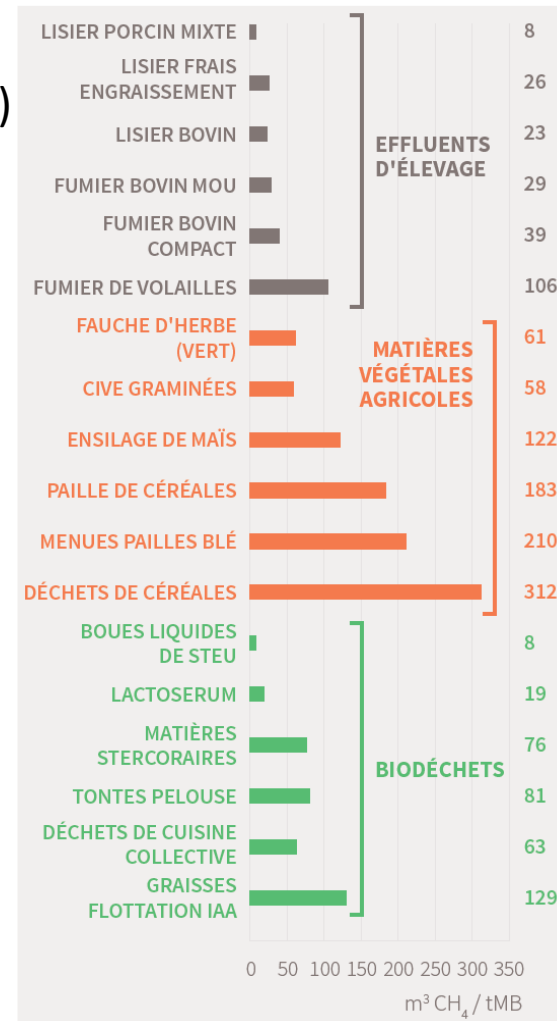
➤ Méthanisation : 3. Diversité des installations et des intrants

- humidité,
- caractère fermentescible puis méthanogène,
- présence de composés en compétition avec la méthanogenèse ou toxiques.

Des installations de statuts variés :

- A 1 agriculteur (micro-) ;
 - D'un groupe d'agriculteurs (coopérative ou autre) ;
 - Associées à/gérées par d'autres secteurs (STEP, urbain ...)
- impactant la possibilité pour les agriculteurs de choisir :*
- les intrants,
 - le process et la valorisation énergétique,
 - le post-traitement des digestats et leur utilisation.

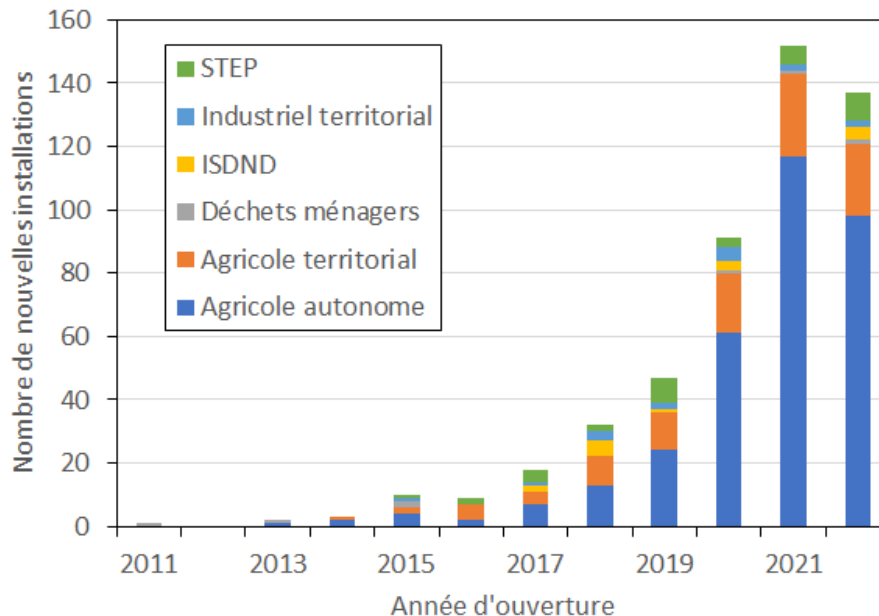
Des potentiels de production de méthane liés aux intrants :



Les réglementations :

- (ICPE ; ...)
- **Conditions d'achats**
 - du biométhane : la prime « effluent d'élevage » ;
 - de l'électricité (des changements récents) ;
- **Intrants** : nouveaux usages des terres (Farmsaat, 2023), culture principale ≤15% des intrants (Décret no 2022-1120 du 4 août 2022) ;
- **L'épandage/Le statut des digestats** : « produits » pour ceux d'origine agricole ou agro-alimentaire dès lors qu'est mis en œuvre le cahier des charges DIG (Arrêté du 22 octobre 2020) (règlement. en cours de changement).

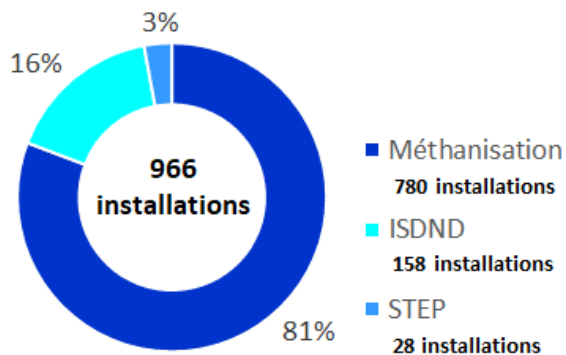
Nouvelles installations en injection :



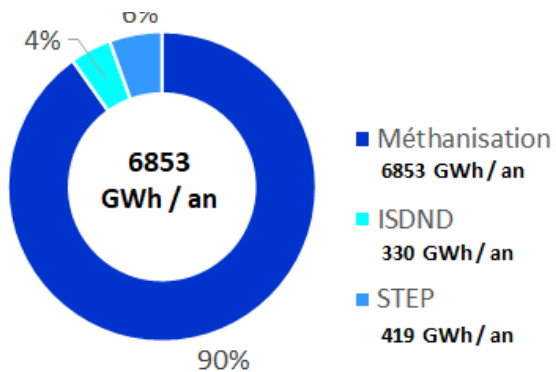
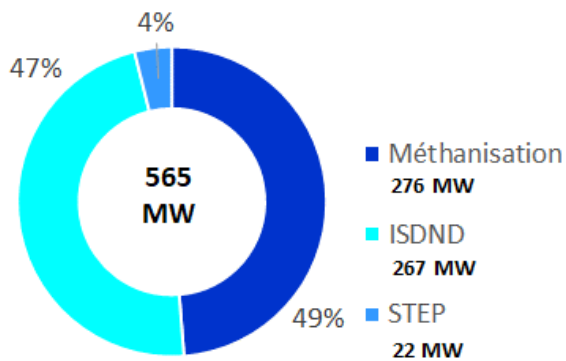
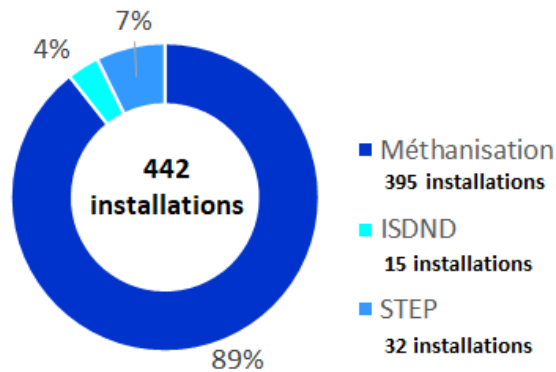
➤ Méthanisation : 4. Importance des installations agricoles mais ...

Nombre d'installations, puissance ou énergie délivrée à l'année (mi-2022) :

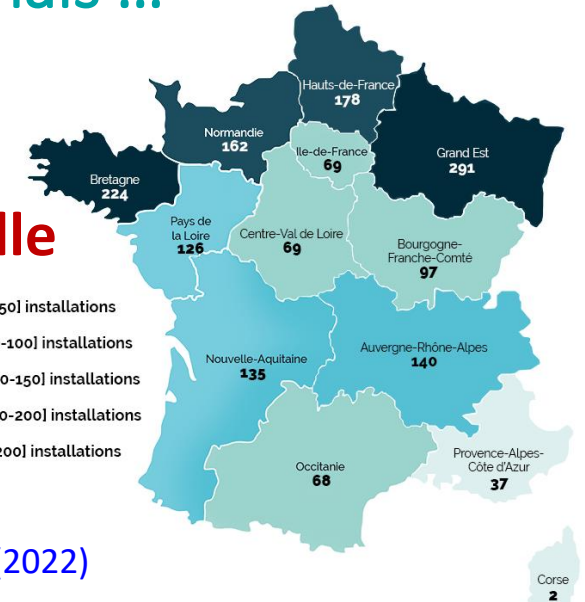
Cogénération



Injection

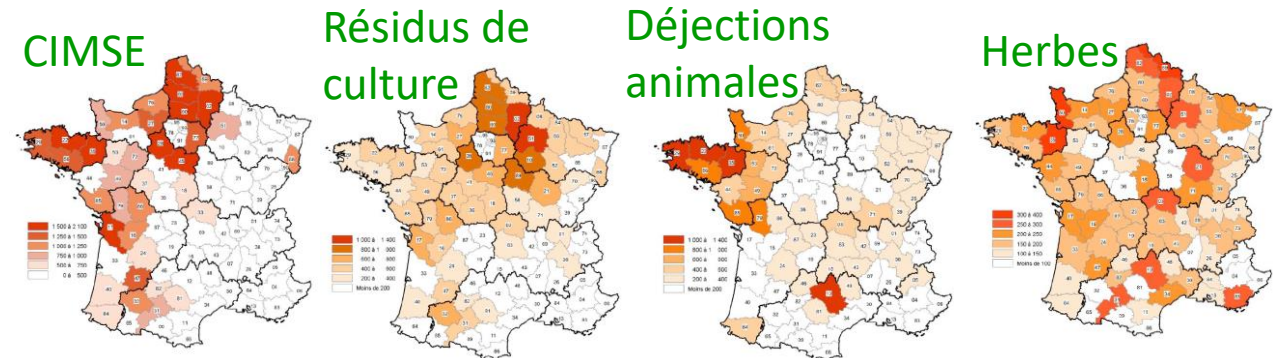


Distribution à l'échelle des régions :



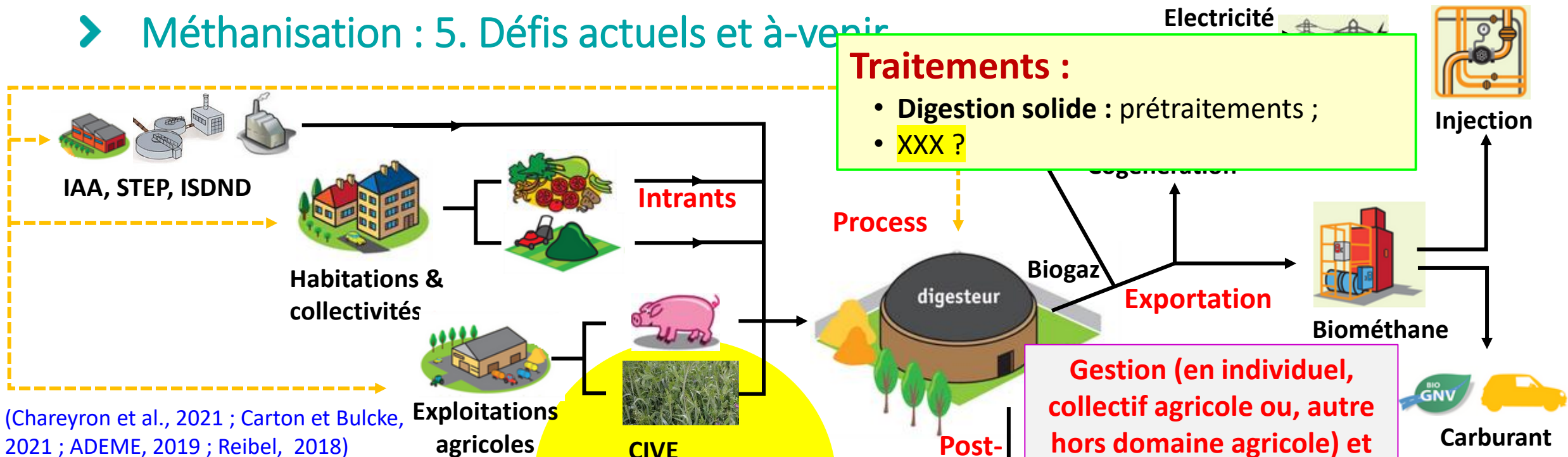
MethaFrance (2022)

Potentiel de production de méthane, 2050



Solagro (2017) via ADEME (2018a)

➤ Méthanisation : 5. Défis actuels et à-venir



Traitements :

- Digestion solide : prétraitements ;
- XXX ?

Gestion (en individuel, collectif agricole ou, autre hors domaine agricole) et taille du dispositif

(Chareyron et al., 2021 ; Carton et Bulcke, 2021 ; ADEME, 2019 ; Reibel, 2018)

CIVE, pour être rentable :

- **Calendrier** : faire durer les CIVE d'hiver, semer tôt les CIVE d'été ;
- **Fertilisation N** : risque d'effet inverse au CIPAN, si possible à partir des digestats ;
- **Eau** : stock pour culture suivante ? besoins d'irrigation ?
- **Impact sur rendements** en contexte CC ?

Impact des épandages :

- Biodiversité ?
- Propriétés physiques ? (stabilité structurale, structure, rétention d'eau, infiltrabilité ...)
- (Polémiques restant autour de C).

Durabilité économique :

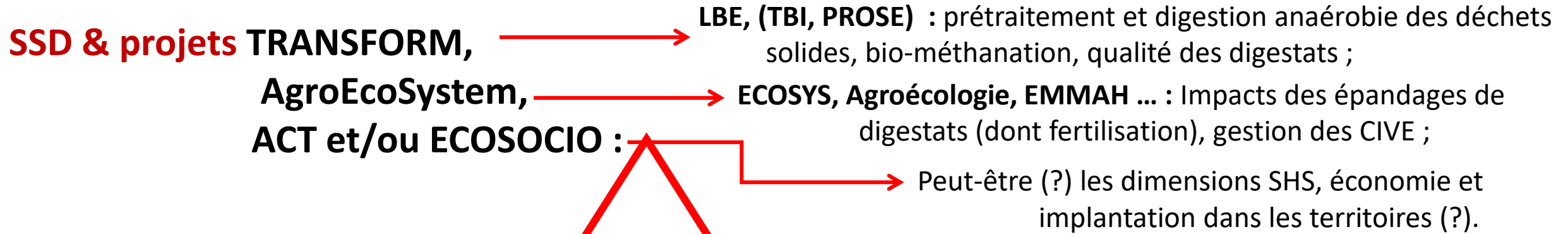
Certains modèles fragiles :

Modèles d'activité de méthanisation	Internalisation et symbiose	Externalisation partielle et technologie générique	Céréalière en injection	Petits collectifs d'agriculteurs
Porteurs des projets	Éleveurs individuels	Éleveur (+ quelques associés)	Céréalière (+ quelques associés)	Céréalières et/ou éleveurs (5-10 associés)
Début des projets	Début des années 2010	Fin des années 2010		
Technologie	Cogénération	Cogénération	Injection	Injection ou cogénération
RCAI/kWe	580 à 850€/an	-510 à 80 €/an	400 à 700€/an	450 à 650€/an

et al., 2021, 2020 ; Jeanne, 2021)

Les modèles d'activité de méthanisation. (©Alexandre Berthe)

➤ Méthanisation : 6. Recherches à INRAE



SOERE PRO (<https://www6.inrae.fr/valor-pro>)

**Thèmes
probablement
peu couverts :**

Carnot 3BCAR (<https://3bcar.fr/>) :

- LBE, TBI, ECOSYS, (FARE, IATE)

1. Modèle économique, durabilité, maîtrise choix ;
2. Priorisation des productions ;
3. Bioéconomie et territoires ;
4. Controverses (dangers, désagréments (odeurs et paysages).

Pôle de compétitivité :

- capenergies (INRAE absente)

INRAE Antilles, BBF & CEREGE ; projet BIOCOMETH sur la valorisation du CO₂ issu d'une unité de méthanisation).

Place d'INRAE et complémentarité par rapport aux autres institutions en charge de la méthanisation ?

(ADEME, ministères (en charge de l'agriculture, l'environnement, de la transition énergétique ...),

Interactions avec les partenaires économiques ?

(GRDF, Energies Renouvelables ...)

Avec les associations professionnelles ?

(AAMF, ATEE ...)

INRAE

Décarboner par la production d'énergie

12-13 janvier 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard

➤ Références « Méthanisation » : 1.

- ADEME, GRDF, GRT gaz. 2018a. La France indépendante en gaz en 2050. In mix de gaz 100 % renouvelable en 2050 ? Etude de faisabilité technico-économique. Rapport de l'étude. 283 p. (<https://librairie.ademe.fr/cadic/1554/france-independante-mix-gaz-renouvelable-010503a-rapport.pdf>)
- ADEME, GRDF, GRT gaz. 2018b. La France indépendante en gaz en 2050. In mix de gaz 100 % renouvelable en 2050 ? Etude de faisabilité technico-économique. Synthèse de l'étude. 283 p. (<https://librairie.ademe.fr/cadic/1554/france-independante-mix-gaz-renouvelable-010503-synthese.pdf>)
- ADEME. 2019. Réaliser une unité de méthanisation à la ferme – Projets de moins de 500 kWé ou 125 Nm³/h. Clés pour Agir. 40 p. (https://aile.asso.fr/wp-content/uploads/2020/06/GUIDE_ADEME_Realiser_unite_methanisation_ferme.pdf)
- afg (Association Française du Gaz). 2022. Chiffres clés des gaz – Edition 2022. 24 p. (https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-pt-vue/AFG_CHIFFRES-CLES-VD-2.pdf)
- Arousseau P., Jouany J.P., Fonty G., Chateigner D. 2021. Les scientifiques réagissent quant à l'impact de la méthanisation sur le sol. Web-Agri, publié le 13/12/2021. (<https://www.web-agri.fr/tribunes/article/204104/les-scientifiques-reagissent-quant-a-l-impact-de-la-methanisation-sur-le-sol> consulté le 29/12/2022).
- Berthe A., Grouiez P., Fautras M. 2021. Heterogeneity of Agricultural Biogas Plants in France: A Sectoral System of Innovation Perspective 1. Journal of Innovation Economics & Management, 11-34. (<https://www.cairn.info/revue-journal-of-innovation-economics-2022-2-page-11.htm>)
- Berthe A., Fautras M., Grouiez P., Issehnane S. 2020. Les formes d'unités de méthanisation en France: typologies et scénarios d'avenir de la filière. Agronomie, Environnement & Sociétés, 17 p. (<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03029356/document>)
- Carton S., Bulcke Q. 2021. L'utilisation des digestats en agriculture ; Les bonnes pratiques à mettre en œuvre. 48 p. (http://www2.agroparistech.fr/IMG/pdf/utilisation_des_digestats_en_agriculture_-_web.pdf)

➤ Références « Méthanisation » : 2.

- Chareyron D., Horsin Molinaro H., Multon B. 2021. Concepts et chiffres de l'énergie : la méthanisation agricole. Culture Sciences de l'Ingénieur. 16 p. (<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/13097/13097-concepts-et-chiffres-de-lenergie-la-methanisation-agricole-ensps.pdf>)
- CSNM (Collectif Scientifique National Méthanisation). 2019. Le pouvoir méthanogène des intrants de méthanisation. 5 p. (<http://cities.reseaudesvilles.fr/cities/5/documents/6gs6tid3ctsg76i.pdf>)
- Esnouf A., Brockmann D., Cresson R. 2021. Analyse du cycle de vie du biométhane issu de ressources agricoles - Rapport d'ACV. INRAE Transfert, 197 p. (https://www.methafrance.fr/sites/default/files/2022-01/153_rapportacv_biomethane-ressources-agricoles_inrae-transfert.pdf)
- Farmsaat. 2023. Maïs, comment produire du biogaz ? (Méthanisation, de quoi parle-t-on ? (<https://www.farmsaat.fr/mais/comment-produire-du-biogaz> consulté le 09/01/2023).
- FNE (France Nature Environnement). 2021. Etat des lieux de l'analyse de controverses (Etat des lieux au 20 décembre 2021). 19 p. (https://www.methafrance.fr/sites/default/files/2022-01/158_methanisation-etat_des_lieux_des_controverses-france_nature_environnement.pdf)
- Grouiez, Pascal, et al. 2020.** Revenus issus de la méthanisation agricole dans un contexte de développement de l'injection. Analyse. Centre d'études et de prospective 153 (2020). (<https://agriculture.gouv.fr/revenus-issus-de-la-methanisation-agricole-dans-un-contexte-de-developpement-de-linjection-analyse>)
- InfoMETHA. 2019. Etat des lieux de la méthanisation en Europe. (<https://www.infometha.org/effets-socio-economiques/etat-des-lieux-de-la-methanisation-en-europe> consulté le 27/12/2022)
- Jeanne D. 2021. Quel avenir pour les différents modèles économiques de la méthanisation ? Web-Agri, publié le 29/12/2021. (<https://www.web-agri.fr/methanisation/article/204482/quel-avenir-pour-les-differents-modeles-economiques-de-la-methanisation> consulté le 29/12/2022).
- MethaFrance (Portail National de la Méthanisation). 2022. En chiffres (<https://www.methafrance.fr/en-chiffres> consulté le 28/12/2022)

➤ Références « Méthanisation » : 3.

- MTECT (Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires). 2022a. Tableau de bord : biométhane injecté dans les réseaux de gaz - Troisième trimestre 2022 (<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/tableau-de-bord-biomethane-injecte-dans-les-reseaux-de-gaz-troisieme-trimestre-2022-0> consulté le 28/12/2022) (et autres pages similaires permettant de remonter jusqu'en 2015).
- MTECT (Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires). 2022b. Tableau de bord : biogaz pour la production d'électricité - Troisième trimestre 2022 (<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/tableau-de-bord-biogaz-pour-la-production-delectricite-troisieme-trimestre-2022-0> consulté le 28/12/2022) (et autres pages similaires permettant de remonter jusqu'en 2015).
- Obersv'ER, ADEME. 2020. Chiffres clés du parc d'unités de méthanisation en France au 1er janvier 2020. Diaporama (48 diapo.). (<https://www.sinoe.org/documents/download/idDoc/1211>)
- ODRE. 2022. Points d'injection de Biométhane en France en service. ([https://odre.opendatasoft.com/explore/dataset/points-dinjection-de-biomethane-en-france/information/](https://odre.opendatasoft.com/explore/dataset/points-dinjection-de-biomethane-en-france/information/?disjunctive.site&disjunctive.nom_epci&disjunctive.departement&disjunctive.region&disjunctive.type_de_reseau&disjunctive.grx_de_mandeur&disjunctive.ndeg_de_pitd_pitp&disjunctive.augmentation_prevue) consulté le 28/12/2022)
- Reibel A. 2018. Valorisation agricole des digestats: Quels impacts sur les cultures, le sol et l'environnement. La méthanisation en Provence-Alpes-Côte d'azur. Groupe Energies Renouvelables, Environnement et Solidarités. 63 p. (https://www.geres.eu/wp-content/uploads/2019/10/ARE1805.201.ENV_VALOMOII.Etude_Digestats_VF.pdf)
- Salmon D. 2021. La méthanisation dans le mix énergétique : enjeux et impacts. Rapport d'information fait au nom de la mission d'information. Sénat, Session extraordinaire de 2020-2021. n°872 (enregistré à la Présidence du Sénat le 29 septembre 2021). 225 p. (<http://www.senat.fr/rap/r20-872/r20-8721.pdf>)

➤ Références « Méthanisation » : 4.

Scohy D. 2021. S. Houot (Inrae) rétablit les vérités quant à l'impact du digestat dans le sol. Web-Agri, publié le 02/12/2021.

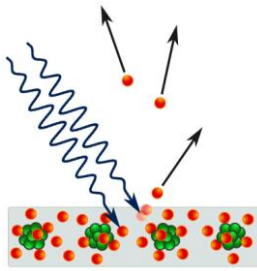
(<https://www.web-agri.fr/methanisation/article/202031/s-houot-inrae-retablit-les-verites-quant-a-l-impact-du-digestat-dans-le-sol> consulté le 29/12/2022).

Ser, GRDF, GRT gaz, Teréga. 2021. Panorama des gaz renouvelables en 2021. 32 p. (<https://www.grtgaz.com/sites/default/files/2022-03/Panorama-du-gaz-renouvelable-2021.pdf>)



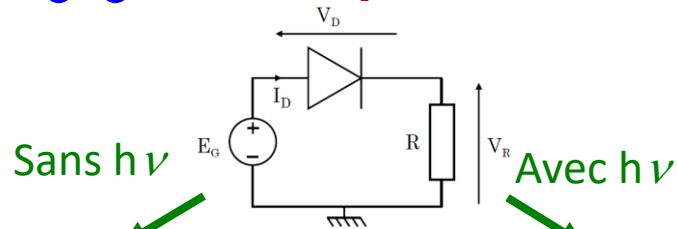
➤ Agri-photovoltaïsme : 1. Petit aperçu technologique

Effet photoélectrique (EPE) :



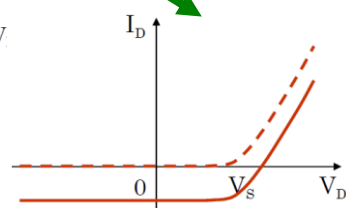
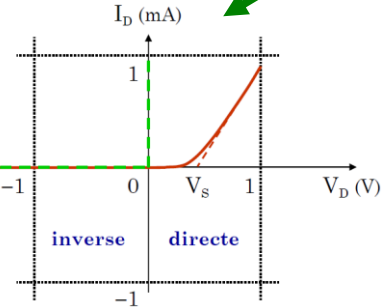
Dopé en donneur e^- Dopé en accepteur e^-

Transistor N-P et effet photoélectrique :

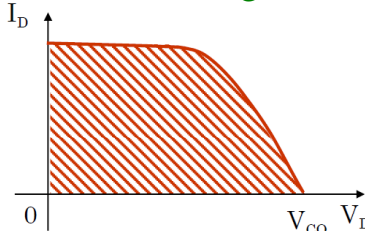
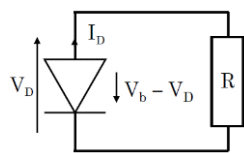


Sans $h\nu$

Avec $h\nu$



Sans générateur E_G



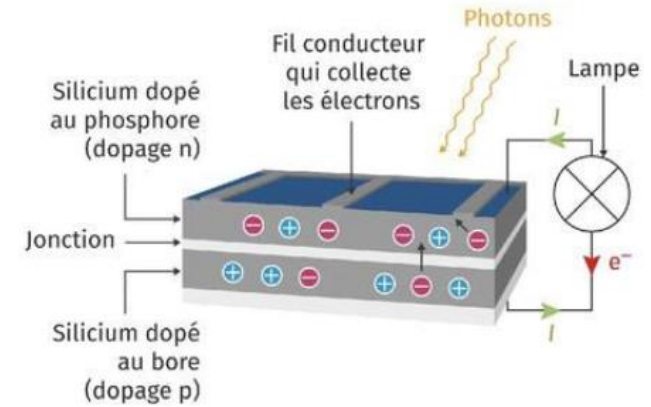
(Masson, 2013)

INRAE

Décarboner par la production d'énergie

12-13 janvier 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard

Exemple de cellule PV :



(Nassiri, 2019)

Différentes technologies de cellules/panneaux :

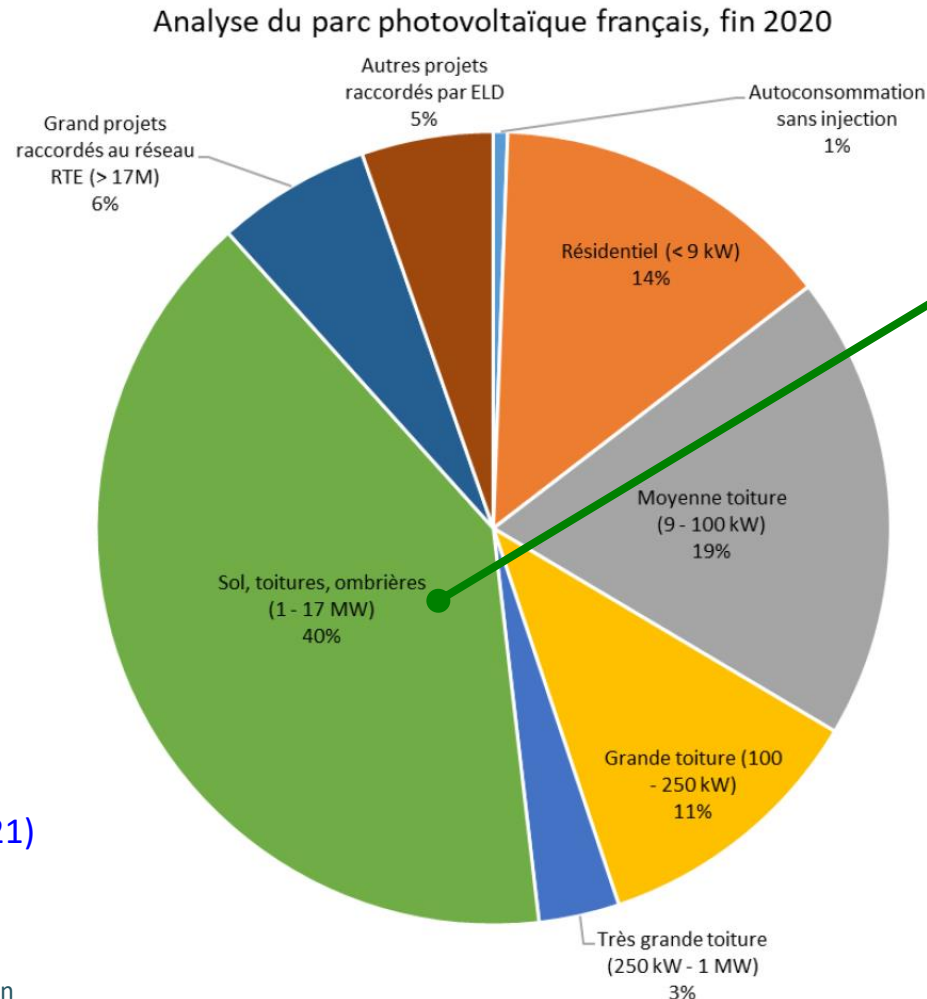
Filière	Rendement	Maturité
Silicium cristallin		
<i>Sous-familles :</i>		
Monocristallin	16 à 21%	Environ 90% du marché mondial dont
Multi-cristallin	14 à 15%	60% pour le multi-cristallin
Couches-minces	5 à 15%	Environ 10% du marché mondial
Cellules à concentration	20 à 30%	Stade de démonstrateur en fonction du pouvoir concentrateur
Cellules organiques	5 à 10% (cellule)	Stade expérimental
Cellules pérovskites hybrides	22% (cellule)	Stade expérimental

Source : DGEC, ADEME, DGRI (MTE, 2022b)

➤ Agri-photovoltaïsme : 2. Part dans le photovoltaïsme

5 grands types de photovoltaïsme (ADEME cité par Cour des Comptes (2021)) :

- le photovoltaïque résidentiel raccordé ;
- les installations sur moyenne toiture ;
- les grandes toitures ;
- les ombrières ;
- les centrales au sol.



Une fraction seulement est liée à l'agriculture où à des espaces « naturels » ! (les ombrières incluent les parkings couverts ...)

(ADEME, 2021)

➤ Agri-photovoltaïsme : 3. Evolution et avenir envisagé (PPE)

Un potentiel très supérieur à des objectifs peu ambitieux :

- ADEME (2019a-b) : 53 GWc, dont 49 GWc sur **zones délaissées** (hors friches agricoles) et 4 GWc sur **parkings** ;
- **XXX** (<http://www.senat.fr/rap/l22-013/l22-0134.html>) ;
- INRAE non officiel 😊 : 250 GW pour 250 000 ha en APV, soit 290 TWh (les 2/3 de la cons. finale d'électricité en 2021).

Pour mémoire : ambition de multiplier par 10 la filière (Macron, le 10 février 2022 à Belfort ([Lien](#)))

Objectif de la PPE (2019-2028) : (ADEME, 2021)

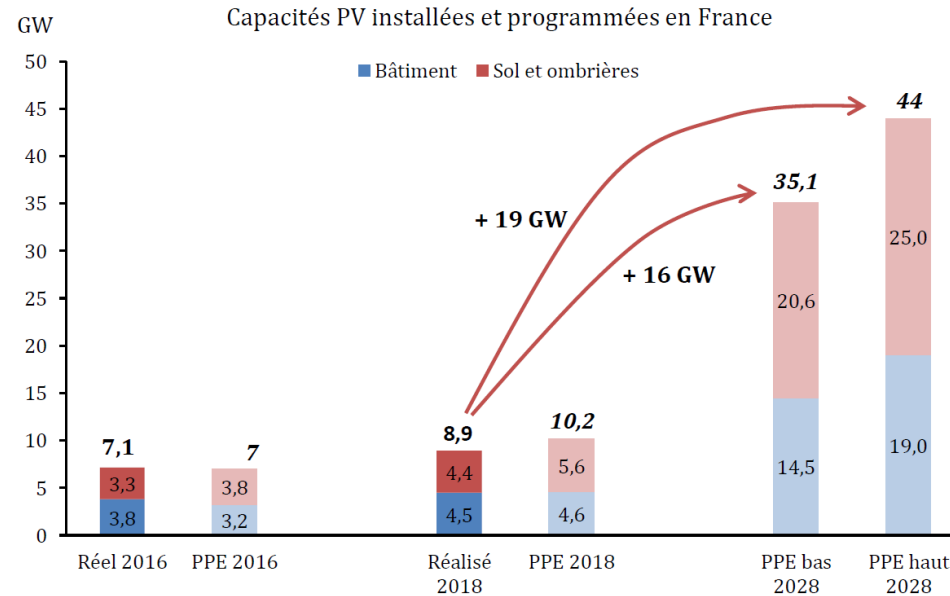
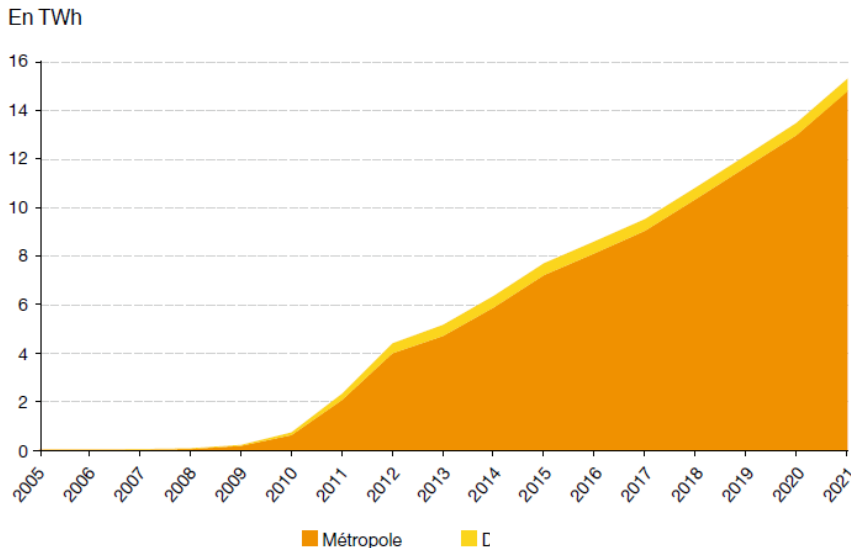


Figure 2 : Capacités PV installées et programmées en France dans le cadre de la PPE, source : SDES Tableau de bord solaire photovoltaïque Quatrième trimestre 2019, Observatoire Energie Photovoltaïque 2019, PPE adoptée en avril 2020

14,5 TWh en énergie primaire consommée en 2021 :

ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE
TOTAL : 15 TWh en 2021



Source : SDES, d'après obligations d'achat, EDF, EDF-SEI et I

(MTE, 2022a)

	Unité	Réalisé			Objectifs	
		2019	2020	2021	2023	2028
Solaire thermique	TWh	1,20	1,22	1,27	1,75	1,85 à 2,5
Photovoltaïque	GW	9,5	10,6	13,3	20,1	35,1 à 44,0

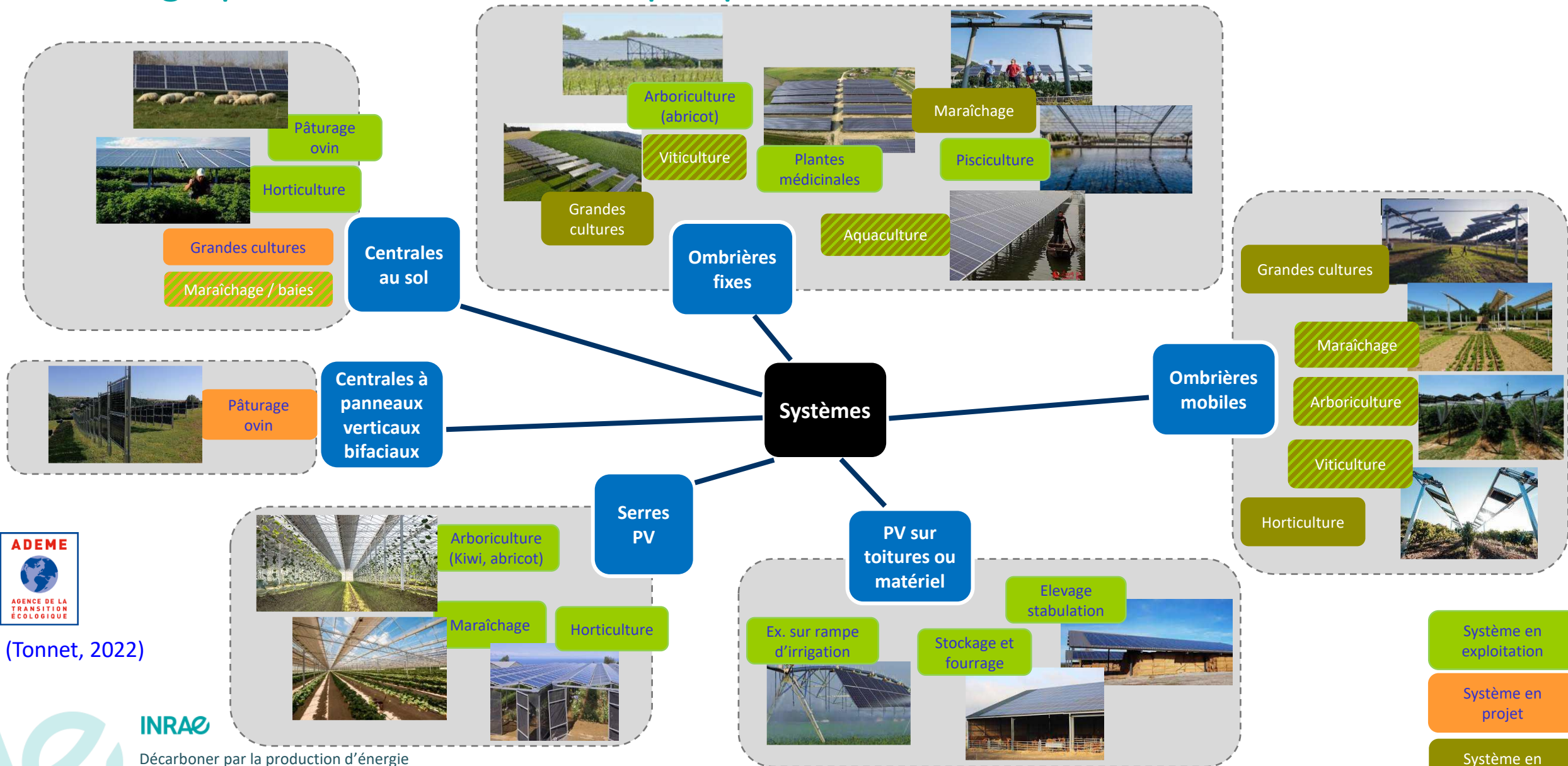
(MTE, 2022a)

INRAE

Décarboner par la production d'énergie

12-13 janvier 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard

➤ Agri-photovoltaïsme : 4. De quoi parlons-nous ?



(Tonnet, 2022)



Décarboner par la production d'énergie

12-13 janvier 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard

Système en exploitation

Système en projet

Système en expérimentation

➤ Agri-photovoltaïsme : 5. défis à-venir

Défis technologiques : nouvelles générations de cellules photovoltaïques principalement liées à de nouveaux composés au niveau des jonctions, recyclage des panneaux solaires en fin de vie (i.e. après 25-30 ans) ;

Fonctionnement biophysique des systèmes de culture et d'élevage en agri-PV (Louarn et al., 2022) :

- Impacts **sur le microclimat** des parcelles/serres, **sur les plantes** et leurs interactions avec le milieu, **sur la biodiversité** des agroécosystèmes, **sur les bioagresseurs et les maladies** des cultures ? (Idéotypes ?)
- Impacts **sur la physiologie et le comportement des animaux**, et les **problématiques sanitaires** d'élevage en extérieur ?
- Impacts **sur les sols** (stockage de C, cycles biogéochimiques), **les émissions de GES**, et **le bilan énergétique** ?
- Impacts sur la mortalité de certaines espèces due aux panneaux (e.g. chauves-souris...) ou à la prédation (volailles ...) ?

Gestion, pilotage de l'agri-PV à différentes échelles (Louarn et al., 2022) :

- **La résilience des exploitations est-elle améliorée par l'agri-PV** face aux aléas climatiques et économiques ?
- Possibilité de **réguler les aléas climatiques**, **déployer des stratégies** prophylactiques, **optimiser les revenus** agric./électr. ?
- Définition d'indicateurs agrégés évaluant la pertinence d'une installation dans un contexte donné ?
- Réorganisation du travail induit par l'agri-PV ? Quelles évolutions des pratiques ?

Pour une bioéconomie à l'échelle des territoires (Louarn et al., 2022) :

- Contributions de l'agri-PV à une bioéconomie territoriale ?
- Quelles configurations économiquement durables et socialement acceptables (impact paysager ...) ?
- Quelles modifications introduire dans le droit agricole pour orienter ces projets ?

➤ Agri-photovoltaïsme : 6. Recherches à INRAE

SSD & projets	AgroEcoSystem,	très impliqué	PSH, ISPA, ABSys, LEPSE, EGFV, P3F, ECOSYS, ITAP, UE Pech Rouge
	SPE ou AES,	ISA	Couvrent plutôt bien le volet "Fonctionnement biophysique des systèmes de culture et d'élevage en agri-PV" et le volet "pilotage", même si réponses non coordonnées aux AAP ;
	BAP ou SPE,	BFP	
	AQUA,	G-EAU	
	ECODIV,	UREP, ISPA	
	PHASE, BAP ou AES,	UE FRE, UE Herbipole	
	ECOSOCIO,	AGIR	
	ACT	UMRH	Volets SHS (dont économie) peu/pas couverts

Pôle national Recherche, Innovation et Enseignement sur l'Agri-Photovoltaïsme :

Carnot Plant2Pro (<https://www.plant2pro.fr/>) : intéressé plus particulièrement par le volet "résilience" associé à l'agri-PV ;

Pôle de compétitivité :

- **capenergies** (INRAE absent sauf INRAE Antilles, BBF & CEREGE).

Liens privés très nombreux:

- EDF, ENGIE, Total-énergie,
- Sun'R, Urbasolar, SunAgri ...
- ADEME (avec création Observatoire), Arvalis



INRAE

Décarboner par la production d'énergie

12-13 janvier 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard

➤ Références « Agri-photo-voltaïsme » : 1.

- ADEME. 2019a. Évaluation du gisement relatif aux zones délaissées et artificialisées propices à l'implantation de centrales photovoltaïques – Rapport final (avril 2019). 75 p. (<https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/846-evaluation-du-gisement-relatif-aux-zones-delaissees-et-artificialisees-propices-a-l-implantation-de-centrales-photovoltaïques.html>)
- ADEME. 2019b. Évaluation du gisement relatif aux zones délaissées et artificialisées propices à l'implantation de centrales photovoltaïques – Synthèse (avril 2019). 9 p. (<https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/846-evaluation-du-gisement-relatif-aux-zones-delaissees-et-artificialisees-propices-a-l-implantation-de-centrales-photovoltaïques.html>)
- ADEME. 2021. Caractériser les projets photovoltaïques sur terrains agricoles et l'agrivoltaïsme – Etat de l'art bibliographique (Sept. 2021). 141 p. (<https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/4992-caracteriser-les-projets-photovoltaïques-sur-terrains-agricoles-et-l-agrivoltaïsme.html>)
- Cour des Comptes. 2021. L'analyse des coûts du système de production électrique en France – Observations définitives ((Article R. 143-11 du code des juridictions financières) (S2021-2052, 2^{ème} Chambre, 3^{ème} Section). 104 p. (<https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/2021-12/20211213-S2021-2052-analyse-couts-systeme-production-electrique-France.pdf>).
- Destruel P., Seguy I. 2007. Les cellules photovoltaïques organiques. Reflets de la physique, 6. 16-18. (<https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2007/04/refdp20076p16.pdf>)
- Equer et al. 2007. Dossier Photovoltaïque. Dossier de la Société Française de Physique (décembre 2007). 36 p. (https://www.refletsdelaphysique.fr/images/stories/news/Dossier_photovoltaïque.pdf)
- Louarn G., Cailliate R., Galdin M., Bourdoncle F. 2022. Compte-rendu de l'animation INRAE – Plant2Pro sur l'agrivoltaïsme (mercredi 30 novembre 2021). 6 p. (Document à demander auprès des auteurs).
- Masson P. 2013. La diode photovoltaïque - Université de Nice ; Edition 2013-2014. 109 diapositives. (<http://users.polytech.unice.fr/~pmasson/Enseignement/Diode%20photovoltaïque%20-%20Projection.pdf>).



➤ Références « Agri-photo-voltaïsme » : 2.

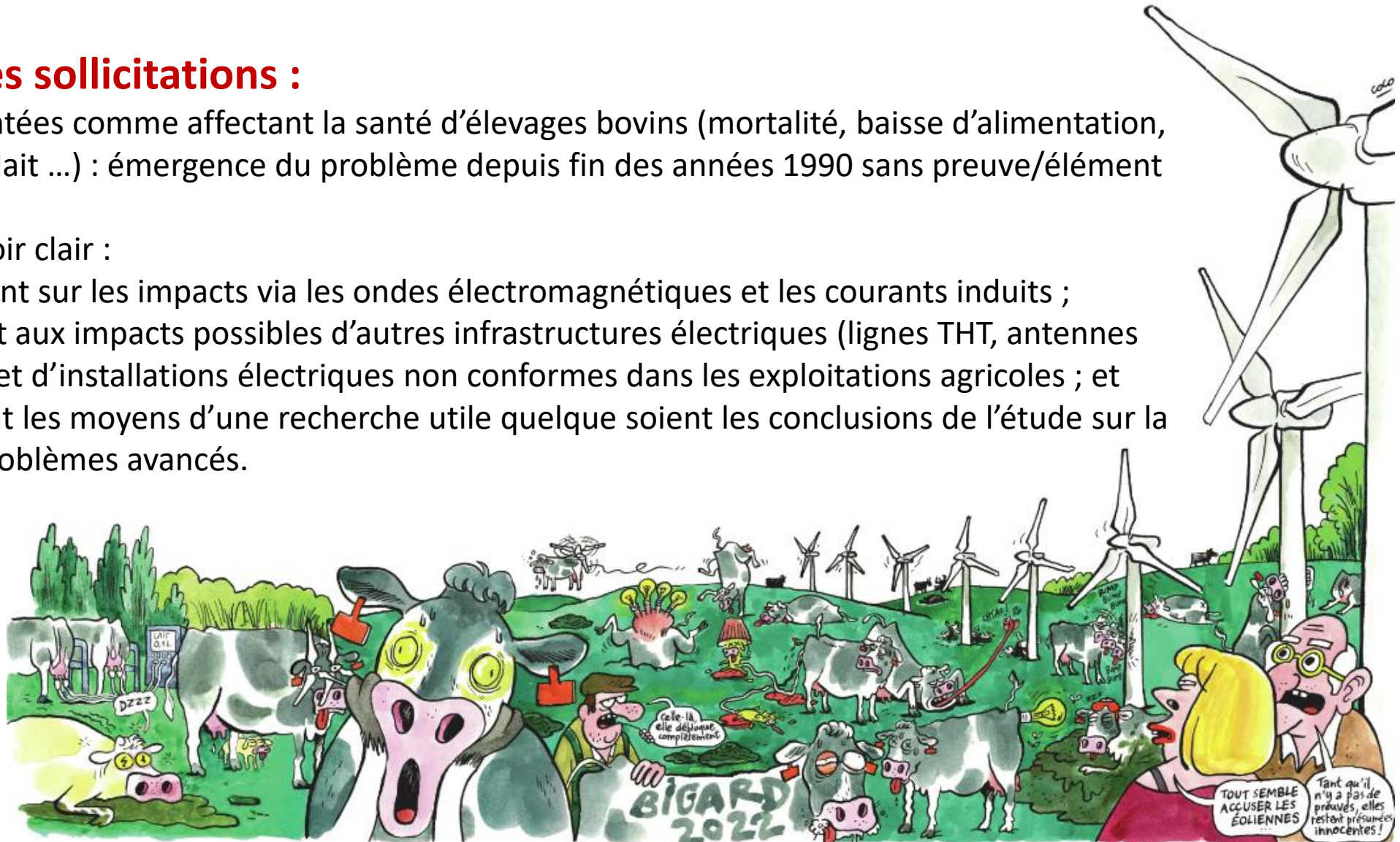
- MTE (Ministère de la Transition Energétique). 2022a. Chiffres clés des énergies renouvelables ; édition 2022 (septembre 2022). 100 p. (<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energies-renouvelables-2022/pdf/chiffres-cles-des-energies-renouvelables-2022.pdf>).
- MTE (Ministère de la Transition Energétique). 2022b. Solaire. (<https://www.ecologie.gouv.fr/solaire> consulté le 03/01/2023).
- MTECT. 2022. Tableau de bord : solaire photovoltaïque - Quatrième trimestre 2021 (Publié le 25/02/2022). (<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/tableau-de-bord-solaire-photovoltaique-quatrieme-trimestre-2021#:~:text=La%20production%20d'%C3%A9lectricit%C3%A9%20d,%C3%A9lectrique%20fran%C3%A7aise%20sur%20cette%20p%C3%A9riode> Consulté le 03/01/2023).
- Nassiri M. 2019 (?). Les cellules photovoltaïques ; Terminale enseignement scientifique. Coquillages & Pointcarré. 7 p. (<https://fr.calameo.com/read/0062173636b5f2d72c671> consulté le 06/01/2023)
- Tonnet N. 2022. Caractériser les projets photovoltaïques sur terrains agricoles et proposition de définition de l'agrivoltaïsme. INRAE au SIA2022 – Les rencontres ; rencontre ADEME-INRAE (mercredi 2 mars). (<https://www6.inrae.fr/rencontresia/Les-rencontres-2022/Agrivoltaisme> séquence vidéo entre 0:29:25 et 0:47:24).



➤ Eolien « agricole » : 1. un impact sur la santé animale ?

Le contexte et les sollicitations :

- Les éoliennes pointées comme affectant la santé d'élevages bovins (mortalité, baisse d'alimentation, de production de lait ...) : émergence du problème depuis fin des années 1990 sans preuve/élément objectif ;
- La nécessité d'y voir clair :
 - i. en se focalisant sur les impacts via les ondes électromagnétiques et les courants induits ;
 - ii. en élargissant aux impacts possibles d'autres infrastructures électriques (lignes THT, antennes 4G ou 5G ...) et d'installations électriques non conformes dans les exploitations agricoles ; et
 - iii. en se donnant les moyens d'une recherche utile quelque soient les conclusions de l'étude sur la réalité des problèmes avancés.



INRAE

Décarboner par la production d'énergie

12-13 janvier 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard

<https://charliehebdo.fr/2020/07/ecologie/le-mystere-des-eoliennes-tueuses-des-eoliennes-tueuses/>

➤ Eolien « agricole » : 2. Consortium et stratégie de travail proposée

5 axes de travail, plusieurs départements INRAE impliqués :

- Axe 1. Observatoires pour des approches épidémiologiques ;



- Axe 2. Etude de l'environnement électromagnétique, analyse fine des courants induits dans les sols et sous-sols ;



- Axe 3. Analyse du comportement des animaux ;



- Axe 4. Formation / communication / Controverses ;



- Axe 5. Diagnostic & méthodes d'intervention



Conclusions



INRAE

Décarboner par la production d'énergie

12-13 janvier 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard

➤ Conclusions : 1.

- Faire le lien avec le projet de SNBC-3 et suggérer éventuellement des inflexions :
 - **Ne pas surévaluer le potentiel de la biomasse-énergie**, même s'il y a encore une marge d'accroissement aux niveaux bois-énergie et méthanisation-biométhane ;
 - A l'inverse, **ne pas sous-estimer le potentiel du photovoltaïsme** (dont l'agri-) ;
 - **Clarifier le statut à-venir des biocarburants / évolutions** (installations de nouvelles chaudières à fioul déjà interdites, ventes de véhicules neufs à moteurs thermiques interdites en 2035) ;
 - Sachant que la consommation d'énergie-chaleur est le premier poste de consommation, (i) **tenter d'améliorer la récupération utile de chaleur** à partir de centrales électriques (nucléaires notamment), et (ii) **éviter dès que possible le chauffage électrique** : les 2/3 de l'énergie primaire alors perdus pourraient être utilisés au chauffage et réduire l'écart entre consommation d'énergie primaire et consommation finale énergétique ;
 - Mettre en œuvre différentes mesures pour améliorer le bilan carbone ;
 - **Forêts** : **(1)** accompagner les propriétaires privés pour accroître l'exploitation de la forêt privée (3,3 M propriétaires pour 75% des surfaces en France métropolitaine), **(2)** modifier les règles de chasse et informer le grand public sur leur bien fondé, **(3)** favoriser la filière bois d'œuvre en France pour réduire le déficit (actuellement de 7 Md €) entre exportations et importations, et **(4)** accompagner le repeuplement végétal actif des forêts par des variétés adaptées au CC qui est trop rapide pour que l'adaptation puisse se faire « passivement » (suppose 150-200 M€ par an) ;
 - **Méthanisation** : **(1)** nécessité de sécuriser les business modèles adoptés par rapport aux fluctuations de tarifs du biométhane ou de l'électricité produite par cogénération pour éviter de mettre en situation d'échec des agriculteurs soumis à des baisses de prix d'achat, **(2)** éviter que la production de CIVE ne soit source de déficits hydriques supplémentaires et d'apport de N en excès, et **(3)** réfléchir le statut des digestats (déchets/produits) selon les intrants des méthaniseurs, voire les process choisis ;



➤ Conclusions : 2.

- **Agri-photovoltaïsme : (1)** Optimiser le complémentarité 'énergéticien-exploitant agricole' en privilégiant la production agricole, et **(2)** ;
- **Au niveau des recherches, des besoins majeurs au niveaux SHS et économie :**
 - Acceptabilité sociale (i) de l'exploitation/la gestion des forêts, (ii) de la méthanisation (risques, odeurs, paysages), et (iii) des installations agro-photovoltaïques ;
 - Analyse gestion des controverses : sur l'installation d'oppositions ;
 - Besoin d'accès à des informations objectives, possibilités de lancer des démarches de type participatif ?
 - Nécessité de consolider des modèles économiques et d'évaluer les fragilités de certains modèles actuels pour prévenir des accidents (ex. méthanisation « autonome » avec sous-traitance de certaines opérations aux installateurs (allemands notamment) ;
- **Au niveau des recherches, des besoins de travaux dans les sciences naturelles et technologiques :**
 - Forêts : essences adaptées aux CC et aux bioagresseurs (scolytes ...) ; vers une évaluation quantitative des dégâts causés aux forêts par les gros gibiers ... ;
 - Méthanisation : prétraitements et optimisation de la méthanisation de déchets solides ;
 - « Nouveaux » procédés
 - de valorisation des biomasses : pyro, biocarburants de seconde génération ;
 - (Innovations au niveau des cellules photovoltaïques) ;
 - Front de science : **projets à risques à identifier (risques en cascades MP X-Risques ...)**
 - ➔ pourquoi pas un projet autour de « Etude de l'environnement électromagnétique dans les sols et sous-sols ; impacts sur le comportement des animaux. (liens éoliennes, lignes THT etc.).



Merci de votre attention



INRAE

Décarboner par la production d'énergie

12-13 janvier 2023 / Séminaire inter-Directions Scientifiques – Pierre Renault, Claire Rogel-Gaillard