



HAL
open science

Procédés de transformation du lait : la science allège les factures

Geneviève Gésan-Guiziou

► **To cite this version:**

Geneviève Gésan-Guiziou. Procédés de transformation du lait : la science allège les factures. 2023, 27 p. hal-03957174

HAL Id: hal-03957174

<https://hal.inrae.fr/hal-03957174>

Submitted on 26 Jan 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



 dossier de
PRESSE

INRAE

**Des énergies renouvelables
à la sobriété : la recherche en action**

SOMMAIRE

01

Le bois, source d'énergie
p. 6-11

02

Produire des gaz
renouvelables
p. 12-18

03

Biocarburants
p. 19-21

04

Agrivoltaïsme
p. 22-24

05

Sobriété énergétique
p. 25-28



Glossaire

p. 29

Contactes scientifiques

p. 30

ÉDITORIAL

Des énergies renouvelables à la sobriété : la recherche en action

Si la France n'a pas de pétrole, elle a de la biomasse : ainsi désigne-t-on l'ensemble des matières organiques, c'est-à-dire issues d'êtres vivants, aptes notamment à fournir de l'énergie. C'est d'ailleurs actuellement notre principale source d'énergie renouvelable, devant l'hydraulique ou l'éolien, en grande partie grâce au bois utilisé comme combustible. Il faut rappeler que la surface forestière française a doublé depuis le milieu du XIX^e siècle, ce qui crée de la ressource. Outre le bois, la biomasse inclut notamment le colza, avec lequel on produit des biocarburants, les effluents d'élevage ainsi que les déchets de culture ou les coproduits organiques de l'agro-industrie (drêches de brasserie, mélasse...) susceptibles de produire du biogaz après digestion par des microorganismes dans des méthaniseurs*.

Le potentiel est vaste. En valeur absolue, la France est déjà le 2^e pays producteur d'énergie primaire renouvelable en Europe, mais des progrès restent à faire sur la consommation finale brute d'énergies renouvelables (17^e rang européen) ^[1]. Il ne suffit pas de tourner un robinet pour mettre l'énergie de la biomasse au service du consommateur. Issue du vivant, elle nécessite une chaîne de transformation complexe. D'autant plus que, comparée aux hydrocarbures, la biomasse est volumineuse, peu dense en énergie (il faut beaucoup de biomasse pour générer une même quantité d'énergie qu'avec du pétrole), coûteuse à mobiliser, parfois saisonnière, périssable et très dispersée sur le territoire et pas nécessairement accessible. Sa valorisation énergétique peut aussi créer une compétition avec les cultures alimentaires, et oblige également à des choix d'utilisation : un arbre qu'on brûle, c'est un « puits »* qui ne stockera plus de carbone et un matériau qui ne servira jamais à la construction.



Méthaniseur : aussi appelé digesteur, il s'agit d'un réacteur dans lequel la matière organique est dégradée par des microorganismes en l'absence d'oxygène, ce qui conduit à la formation de biogaz (mélange de méthane, de CO₂ et de quelques gaz traces) et d'un produit solide riche en matière organique, le digestat (résidus solides issus de la méthanisation).

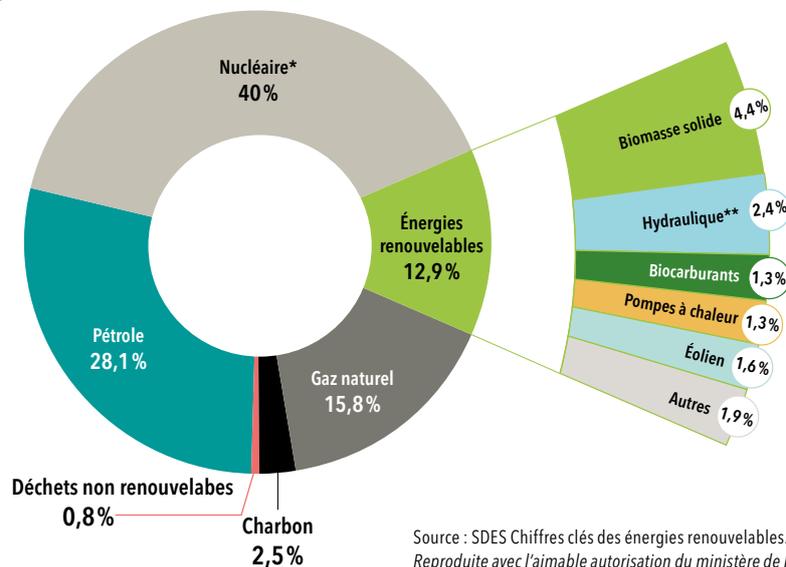
Puits de carbone : la capacité des arbres à absorber et stocker du CO₂ durant leur croissance fait d'eux des « puits de carbone ».

[1] Chiffres clés des énergies renouvelables, édition 2022, ministère de la Transition énergétique, www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/CGDD_A6_CHIFFRES_CLES_EnR_2022_v3_010922_GB_signets.pdf.



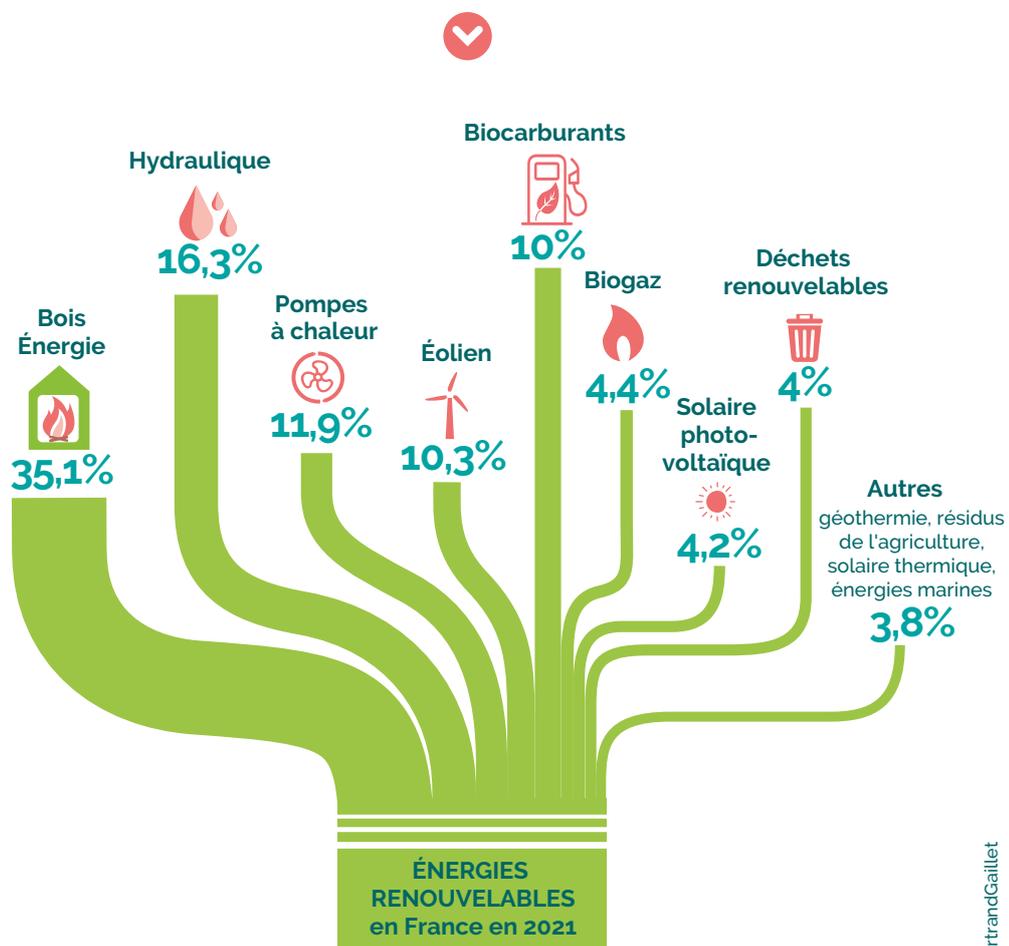
Décarboner notre économie grâce à la biomasse n'est donc pas une mince affaire. Sur tous les aspects de ce défi, fort de sa place de premier institut de recherche français sur les thématiques agriculture, alimentation et environnement, INRAE mène activement des recherches dans le domaine de la bioéconomie et de la mobilisation de la biomasse pour produire de l'énergie tout en veillant aux équilibres entre ses différents usages. Les travaux de l'Institut touchent aussi aux autres énergies renouvelables – comme par exemple l'emploi du solaire sur les surfaces agricoles – et bien entendu à la sobriété énergétique. Car l'objectif de neutralité carbone en 2050 fixé par la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) ne saurait être atteint en France sans une très forte baisse de notre consommation d'énergie. Et que ce soit sur l'évaporation du lait, les besoins en froid, les stations d'épuration ou encore un emploi moderne des ferments, INRAE est aussi au rendez-vous de la recherche sur les économies d'énergie.

Répartition de la consommation d'énergie primaire en France par type d'énergie en 2021



Source : SDES Chiffres clés des énergies renouvelables. Reproduite avec l'aimable autorisation du ministère de la Transition écologique.

Énergies renouvelables en France 2021



Source : calculs SDES



Clé de lecture : la consommation d'énergie primaire issue de ressources renouvelables a doublé entre 1990 et 2021 en France métropolitaine. Le bois-énergie représente 35,1% de la consommation d'énergie primaire issue de ressources renouvelables.

*EnR : énergies renouvelables.





© Adobe Stock



Le bois, source d'énergie

En France, le bois-énergie représente 36% de la production d'énergies renouvelables et 35% de la consommation toutes énergies renouvelables confondues ^[1]. Sa place de 3^e massif forestier d'Europe et de première ressource renouvelable nationale impose la forêt, et donc la filière forêt-bois, comme acteur central de la stratégie d'atténuation du changement climatique. Grand enjeu de la recherche sur le sujet: guider scientifiquement les pratiques forestières afin que les prélèvements soient compatibles avec le caractère renouvelable de l'énergie fournie.

36%
de la production
d'énergies
renouvelables

35%
de la consommation
d'énergies
renouvelables

[1] Chiffres clés des énergies renouvelables, édition 2022, ministère de la Transition énergétique, www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/CGDD_A6_CHIFFRES_CLES_EnR_2022_v3_010922_GB_signets.pdf.

La forêt représente
31 % du territoire de la France métropolitaine
soit **17 millions d'ha**



Répartition

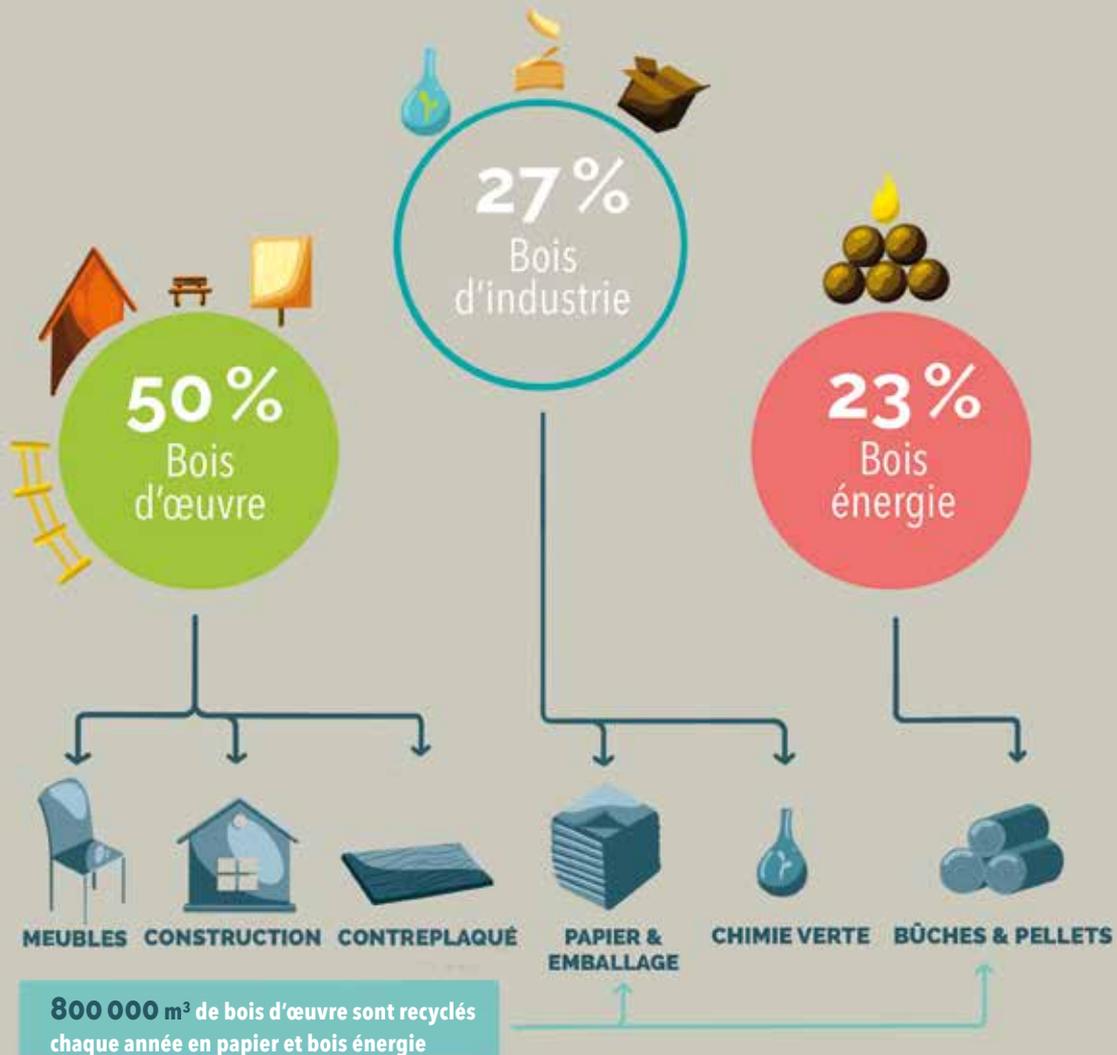
Le capital
« bois » de la forêt
française est de

2,4
milliards de m³

Accroissement
biologique annuel
de la forêt

90
millions de m³

**40 millions de m³ de bois sont récoltés
et commercialisés chaque année**



© INRAE - M. Urlebise

Dans la chaîne du bois, tout se tient

La capacité des arbres à absorber le CO₂ durant leur croissance fait d'eux des « puits de carbone » durant leur vie, aussi bien dans leurs parties aériennes que souterraines. Même s'il se détériore sous l'effet de 3 facteurs (diminution de la production biologique, augmentation de la mortalité, accroissement des prélèvements), le puits forestier a, selon le Haut conseil pour le climat, participé en 2020 à compenser environ 4 % des émissions nationales de gaz à effet de serre [2]. Mais la séquestration du carbone dans l'écosystème forestier n'est que l'un des 4 leviers d'atténuation du changement climatique offert par les arbres. Une fois coupés, ils conservent le carbone dans leur bois, lequel est utilisable comme matériau (stockage dans les produits-bois). Employé comme combustible, il peut remplacer le gaz fossile ou le fioul (substitution-énergie). Comme matériau, il évite le recours à des équivalents énergivores comme le béton ou l'acier (substitution-produit). Or, toute politique publique qui privilégie un levier a une incidence immédiate sur les autres. Favoriser le bois comme source d'énergie diminue sa disponibilité comme matériau, ce qui incite à produire davantage de ciment et d'acier, donc à émettre du CO₂. À l'inverse, prélever moins d'arbres augmente le stock de carbone sur pied, mais réduit l'offre de substitution (moins de bois d'œuvre, moins de pellets *, etc.) et réduit les opportunités de replanter des essences plus résilientes au changement climatique. Dans ce contexte, le projet Streisand d'INRAE vise à rationaliser la méthode de comptabilité carbone des produits bois en prenant en compte des facteurs d'influence qui ne sont pas aujourd'hui considérés (marchés, arbitrages consommation/production...), l'objectif final étant de produire un modèle capable d'aider les décideurs à mesurer avec précision les conséquences de chaque choix possible.



© INRAE - B. Cauvin

[2] Les 4% correspondent à l'ensemble du secteur « utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie » (UTCATF): les forêts en constituent le principal puits, le second étant les prairies. Source: Dépasser les constats, mettre en œuvre les solutions. Rapport annuel 2022 du Haut conseil pour le climat, p. 74. www.hautconseilclimat.fr/wp-content/uploads/2022/06/Rapport-annuel-Haut-conseil-pour-le-climat-29062022.pdf



Pellets: aussi appelés granulés de bois, il s'agit d'un combustible pour les poêles, inserts ou chaudières à pellets produits essentiellement à partir de résidus des scieries comme la sciure et les copeaux.

Observatoire pour l'économie de la forêt (OLEF)

Démarrage: 1998

Partenaires: AgroParisTech, université de Lorraine

Objectifs: OLEF rassemble les données économiques et environnementales relatives à la forêt, au bois et aux biens et services qui leur sont liés. Dans un contexte de science ouverte, de partage et d'ouverture des données, OLEF travaille à ce que les données de l'observatoire soient compatibles avec le concept FAIR (Facile à trouver, Accessible, Interopérable et Réutilisable). OLEF a pour objectifs de centraliser l'information pour faciliter recherche, enseignement et expertise ainsi que de pérenniser les données et les mettre à disposition des chercheurs et professionnels du secteur forestier. OLEF participe à la valorisation de ces données à travers l'élaboration d'outils originaux.

Outils:

- Mise à disposition de bases de données, actuelles et historiques, sur la forêt, le bois, les biens et les services liés
- Compilation et analyse des indicateurs de gestion durable des forêts françaises
- Intégration des données environnementales et économiques de la forêt pour la base de données européenne Eurostat.

beta-economics.fr/plateformes/olef/



© INRAE - C. Slagmulder

Cartographier les ressources : Le salut vient du ciel

En France, 75 % des forêts sont privées et se répartissent entre 3,3 millions de propriétaires dont un bon tiers (36 %) possèdent moins de 10 ha ^[3]. Dans un département forestier comme l'Isère, la surface moyenne par propriétaire est même inférieure à 2 ha... Autant dire que la composition précise de cette « forêt timbre-poste » n'est pas connue. Or, comment bien exploiter une forêt, c'est-à-dire garantir sa rentabilité, la protéger des incendies, faire en sorte qu'elle prévienne les risques naturels comme les chutes de pierres et qu'elle atténue les effets du changement climatique, quand on ne la connaît pas en détail ? Longtemps, les forestiers n'ont pas eu d'autre choix que de se rendre sur place pour recenser les essences et mesurer les arbres sur des placettes échantillons ; avec des fortes pentes (40 % et +) en montagne, l'exercice est difficile. Mais depuis une dizaine d'années, INRAE et son partenaire l'IGN, l'Institut national de l'information géographique et forestière, ont su tirer parti du Lidar, un système de mesure optique embarqué sur un avion, hélicoptère ou drone. Par des tirs de laser en direction du sol, lesquels sont réfléchis par la végétation et par le sol, on peut esquisser sous forme de nuages de points la silhouette des arbres. Puis, à l'aide d'algorithmes d'analyse des nuages de points et par recoupement avec des photos aériennes ou satellitaires, les paramètres dendrométriques peuvent être évalués et les principales essences identifiées. INRAE a même développé un logiciel, Sylvaccess, qui indique automatiquement aux exploitants forestiers les potentialités d'accès à la ressource forestière en fonction des modes d'exploitation (débardage par tracteur, par câble, etc.). Les agents de l'ONF, l'Office national des forêts, en font un usage quotidien. Et dans le projet Accessfor, financé par l'Ademe, il servira de base pour un outil générique d'évaluation et de cartographie de l'accessibilité de la ressource forestière à partir des données Lidar, et ce à l'échelle nationale.

[3] France Bois Forêt, interprofession nationale de la filière forêt-bois, franceboisforet.fr/la-foret/la-foret-francaise-en-chiffres/.

Forêts-21

Démarrage (ouverture des données au public) : janvier 2023

Partenaires : ONF, CNPF (Centre national de la propriété forestière), IGN et soutenu par le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire (programme Amont Forestier) et l'Ademe (programme Graine, projet BIOSYLVE)

Objectifs : La plateforme numérique Forêts-21 s'adresse aux opérateurs et décideurs forestiers en France métropolitaine pour faire des projections sur l'évolution des forêts.

Les 3 applications principales sont :

- Comparer les différentes options de sylviculture pour les forêts
- Apprécier les effets de l'évolution de l'atmosphère et du climat sur les forêts
- Analyser les interactions entre l'évolution du climat et de la sylviculture.

Outils :

- Mise à disposition de simulations issues des données de la recherche permettant de suivre l'évolution projetée de 2006 à 2100 pour les forêts de France métropolitaine : données, visualisations graphiques et cartes
- Documentation des modèles de simulation GO+, CAT et ForestGALES représentant respectivement :
 - les processus biophysiques et biogéochimiques et la croissance et la production d'une forêt gérée
 - la distribution des récoltes entre différentes catégories de produits dont le bois-énergie
 - la vulnérabilité des peuplements aux tempêtes
- Itinéraires techniques sylvicoles proposés par les experts pour 4 essences de production (pin, chênes, hêtre, Douglas).

forets21.inra.fr/pelican3.1/

Pour les bûcherons, une boîte à outils... numérique!

Souvent sableux en surface et gorgés d'eau en hiver, les sols forestiers de la région Centre-Val de Loire sont pauvres et contraignants. Les coupes de bois-énergie, par exemple pour une valorisation sous formes de plaquettes, représentent une opportunité pour valoriser des bois de faible valeur commerciale issus soit de travaux sylvicoles, soit de peuplements pauvres ou déperissants. Mais des pratiques récentes, mécanisées, pourraient impacter la fertilité des sols et la biodiversité sur le long terme. En effet, dans l'abattage d'arbres entiers, les grosses branches mais aussi les menus bois (< 7 cm de diamètre) sont sortis de la parcelle. Sans action volontaire, moins de 10% des menus bois restent au sol, alors qu'ils sont 2 à 3 fois plus riches en éléments nutritifs (phosphore, potassium, etc.) que le bois de gros diamètre... sans parler des feuilles, bien souvent exportées elles aussi, qui le sont 7 fois plus. Tel est donc le principal bénéfice d'une ample « boîte à outils » numérique d'aide à la décision, mise au point entre 2016 et 2021 par INRAE Val de Loire et ses partenaires : permettre aux exploitants forestiers de la région de calculer jusqu'où ils peuvent prélever le bois à plaquettes sans nuire à leurs sols... et donc à leur avenir. Dépourvu de dimension contraignante, l'outil fournit aussi diverses recommandations pour le maintien de la qualité des sols et de la biodiversité comme de laisser sur place les pièces de bois mort de gros calibre qui servent de gîte et de couvert à une grande quantité d'espèces. « Bois qui flambe vite ne dure pas longtemps », avertit un vieux proverbe. On ne saurait mieux dire.



© INRAE - B. Nicolas

Réseau expérimental MOS (Manipulation de la matière organique du sol)

Démarrage: 2013

Partenaires: ONF

Capacité: 18 sites expérimentaux situés dans des forêts de production dans la moitié nord de la France (hêtres, chênes et Douglas). Le réseau MOS est unique à l'échelle européenne et internationale par le nombre de sites, d'espèces testées, la taille des parcelles et le stade de développement des arbres

Objectifs: suivi à long terme, sur 30 à 60 ans, des effets de l'exploitation forestière (prélèvements bois, menus bois, litières) sur la fertilité et la biodiversité des sols ainsi que la croissance des arbres et leur santé.

Outils: chaque site est divisé en 12 sous-placettes de 40 m sur 40 m où sont mis en œuvre 4 niveaux d'exploitation différents:

- **Témoin :** prélèvement uniquement du bois fort à chaque éclaircie (diamètre minimal > 7 cm)
- **Sans rémanents :** mode d'exploitation où le menu bois est prélevé en plus du bois fort à chaque éclaircie
- **Sol nu :** mode d'exploitation où, en plus du prélèvement du menu bois et du bois fort à chaque éclaircie, la litière au sol (feuilles mortes, débris végétaux) est également prélevée annuellement (modalité qui n'a aucune réalité sylvicole mais qui permet d'observer des réactions extrêmes de l'écosystème)
- **Compensation :** exploitation avec prélèvement des menus bois à chaque éclaircie et retour au sol de cendres issues de chaufferies-bois.

Prélèvement tous les 3 ans et contrôle des propriétés des sols par spectrométrie infrarouge, analyses physico-chimiques des sols prévue tous les 10 ans (sauf projets spécifiques intermédiaires, ou variation forte des spectres infrarouges).

www6.inrae.fr/in-sylva-france/Services/In-Situ
Réseau-MOS-Manipulation-de-la-matiere-organique-du-sol



Coupes rases: des effets négatifs à atténuer

Une coupe rase consiste à abattre tous les arbres d'une parcelle pour la laisser à nu. La pratique n'a pas bonne presse, en premier lieu parce qu'une coupe rase évoque spontanément un champ de ruines : l'émotion conduit à la juger avec sévérité. La recherche scientifique permet de préciser ses impacts et comment les limiter. Les effets négatifs sur le court terme sont indéniables : les engins forestiers tassent les sols, ce qui freine la régénération de la forêt. Réalisée dans une pente, elle favorise fortement l'érosion des sols. Les surfaces découvertes deviennent vulnérables au lessivage par les pluies, sans parler de la carence en nutriments liée à la pratique actuelle de ramassage des « rémanents », c'est-à-dire les branchages et les feuilles jadis laissés sur place (les récolter majore la biomasse exploitable de 20 % environ, mais double le déficit en nutriments comme l'azote, le phosphore, le calcium, etc. causé par l'abattage). Néanmoins, avec des manières de faire plus respectueuses, l'impact de la coupe rase est plus rapidement réversible. Par exemple, en ménageant des cloisonnements (zones de passage privilégiées qui évitent aux lourdes machines de tasser le reste de la parcelle), en coupant à la tronçonneuse plutôt qu'avec une abatteuse-ébrancheuse afin de sauvegarder les jeunes pousses déjà en place, en débardant les troncs avec des câbles et en évitant de labourer ensuite pour replanter de jeunes arbres élevés en pépinière. Par ailleurs, à l'échelle de la décennie et même lorsque la coupe est sévère, on ne constate généralement pas de catastrophe : la forêt se remet, mais lentement. Par la suite, la résilience de la nouvelle forêt sera augmentée si l'exploitant a su éviter la monoculture et la plantation d'essences inadaptées au milieu et au climat, en particulier dans un contexte de changement climatique rapide.



© Adobe Stock



Plateforme expérimentale Xylosylve

Plateforme de développement et d'évaluation d'itinéraires sylvicoles dédiés à la production de biomasse forestière en Nouvelle-Aquitaine.

Démarrage: 2012 pour une durée de 25 ans minimum

Capacité: 48 ha et 55 000 arbres répartis dans 8 itinéraires sylvicoles contrastés.

Objectifs: 8 itinéraires sylvicoles contrastés sont testés, allant d'itinéraires spécifiquement dédiés à la production intensive de biomasse à des itinéraires agroécologiques économes en intrants et minimisant les émissions de carbone. La plateforme est composée de 3 sites d'observation lourdement équipés qui sont de véritables laboratoires à ciel ouvert pour le suivi des gaz à effet de serre, de la biologie et de la biogéochimie des peuplements et des sols et pour la partie expérimentation de 21 ha de parcelles manipulées permettant d'estimer la productivité des itinéraires.

Outils:

- Suivi des performances agronomiques et de production, ainsi que des impacts environnementaux des 8 systèmes (analyse des cycles biogéochimiques de l'azote, du carbone et du phosphore et bilan des gaz à effet de serre en forêt)
- Mise à disposition de la communauté scientifique et professionnelle d'une plateforme de démonstration, d'une halle technologique de 400 m² pour la mesure de la biomasse, ainsi que des bases de données sur la biologie, la biogéochimie et la biophysique des itinéraires sylvicoles testés.

Application mobile For-Eval

Démarrage: 2020

Partenaire: ONF

Objectifs: aider les gestionnaires forestiers à évaluer la sensibilité des sols à l'aide d'indicateurs écologiques permettant d'établir des diagnostics simples et réalisables sur le terrain pour promouvoir une gestion durable des forêts.

Outils: diagnostics simples de la sensibilité des sols forestiers à des perturbations (prélèvement de biomasse, tassement, érosion, dessèchement). L'application repose sur 5 paramètres mesurables sur le terrain:

- Localisation de la région forestière parmi les 11 grandes régions écologiques de France métropolitaine
- Forme de l'humus, la couche de matière organique qui recouvre le sol
- Texture du sol (ex: sableux, argileux...)
- Effervescence à l'acide pour connaître l'état d'acidité ou de neutralité du sol, ainsi que l'abondance de certains minéraux comme le calcium ou le magnésium
- Profondeur du sol.

url.inrae.fr/3XgZZc3

Plus d'infos:

www6.bordeaux-aquitaine.inrae.fr/ispa/Outils/Outils-d-aide-a-la-decision/For-Eval-une-application-mobile-pour-evaluer-les-sols-forestiers



© Adobe Stock



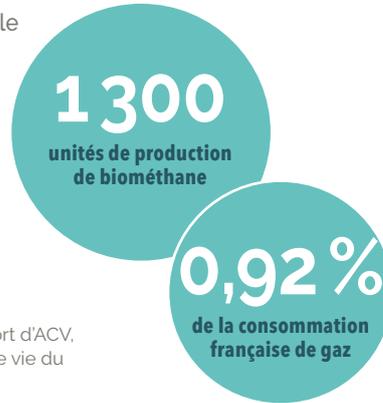
Produire des gaz renouvelables

On associe facilement la production de gaz renouvelable à la méthanisation. Et pour cause, la filière est en plein essor. D'après le ministère de la transition énergétique, le gisement global mobilisable à l'horizon 2030 pour la méthanisation a été évalué à 56 GWh d'énergie primaire en production de biogaz. La méthanisation est un sujet d'étude majeur pour INRAE depuis ses prémices, mais l'institut se penche aussi sur d'autres processus innovants comme la production d'hydrogène par voie biologique.



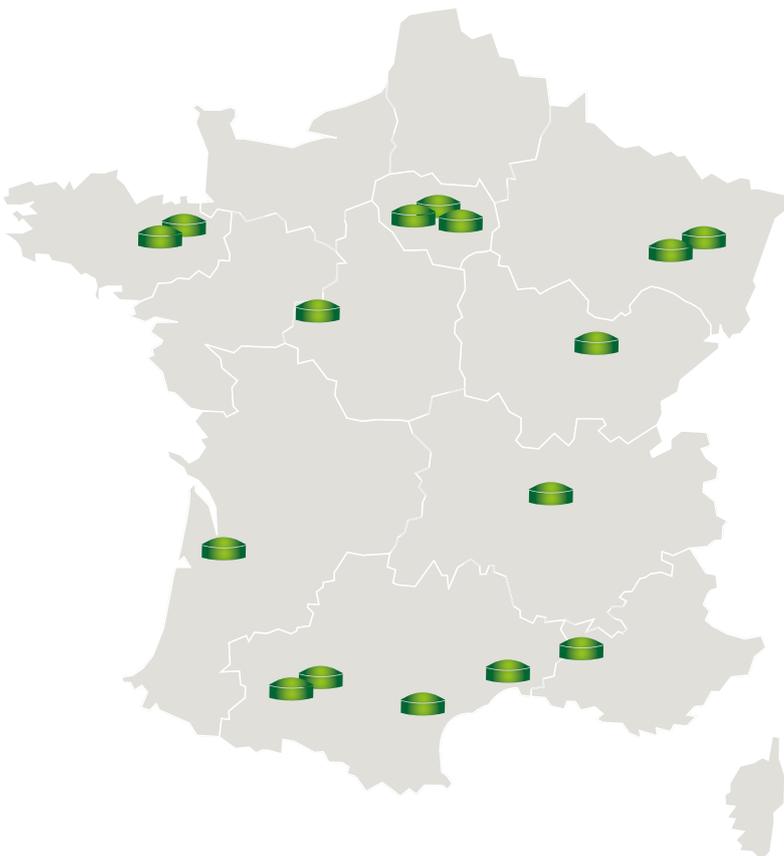
Le biométhane

La méthanisation désigne la production biologique de méthane, le composant principal du gaz naturel, requalifié de biométhane pour le distinguer du gaz fossile. Mature sur le plan technologique, la méthanisation pourrait constituer un des leviers majeurs pour atteindre un mix de gaz 100 % renouvelable dans les réseaux en France en 2050 **[4]**. Fin 2021, on comptait plus de 1300 unités de production de biométhane, qui ont fourni 0,92% de la consommation française de gaz naturel **[5]**. En puissance installée, les régions Grand Est et Hauts-de-France se détachent très nettement tandis qu'en nombre de sites, la Bretagne arrive en 3^e position **[5]**. Ces méthaniseurs sont installés, dans leur grande majorité, dans des exploitations agricoles **[5]**.



[4] Analyse du cycle de vie du biométhane issu des ressources agricoles, rapport d'ACV, INRAE Transfert. Esnouf A., Brockmann D., Cresson R. (2021). Analyse du cycle de vie du biométhane issu de ressources agricoles - Rapport d'ACV. INRAE Transfert.

[5] SER, GRDF, GRTgaz, le SPEGNN et Teréga. Panorama des gaz renouvelables en 2022, p. 8-10, www.grtgaz.com/sites/default/files/2022-03/Panorama-du-gaz-renouvelable-2021.pdf



La méthanisation à INRAE

La méthanisation est un sujet majeur des recherches INRAE depuis ses débuts. Optimisation des procédés de méthanisation, valorisation des digestats* et autres gaz produits avec le biométhane, études socioéconomiques sur le développement de la filière... Avec ses 17 unités de recherche dans 11 centres situés dans 9 régions de France métropolitaine, INRAE est aujourd'hui un des premiers organismes de recherche au monde pour sa production scientifique sur le sujet.



Digestat: ce sont les résidus, ou déchets « digérés », issus de la méthanisation des déchets organiques.

Aider les méthaniseurs à carburer plein gaz

La grande majorité des méthaniseurs installés en France fonctionne en « voie liquide », notamment avec les lisiers collectés par l'agriculteur. La part solide, qui ne dépasse pas 10 à 15 %, peut être constituée de déchets (résidus de culture, restes de l'industrie agroalimentaire...) et en partie de cultures dédiées, comme les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE). Stockées dans un réacteur étanche à l'air, ces matières servent à nourrir des microorganismes anaérobies*, lesquels en échange vont produire un biogaz composé pour l'essentiel de méthane (CH₄; 50 à 70 %) et de dioxyde de carbone (CO₂). Le méthane peut ensuite alimenter une turbine pour produire de la chaleur et de l'électricité (cogénération) ou bien, une fois filtré grâce à des procédés membranaires, être injecté dans le réseau d'alimentation en gaz (il prend alors le nom de biométhane). Selon que la matière utilisée vient plutôt de l'élevage (potentiel méthanogène faible) ou des cultures (potentiel méthanogène fort), le rendement d'un méthaniseur peut varier de 70 à 140 m³ de biométhane pour chaque m³ d'intrant. À l'intérieur du méthaniseur, des pales viennent agiter le milieu pour assurer le mélange de l'ensemble et éviter les phénomènes de décantation. Le projet RELOAD, coordonné par la société Air Liquide et auquel participe INRAE, vise d'ailleurs à modéliser l'hydrodynamique du liquide pour optimiser l'agitation. Parmi les améliorations recherchées, INRAE ambitionne notamment de mieux piloter le processus de méthanisation. En effet, les réacteurs acceptant une grande variété de matières, il arrive que certaines soient plus rapidement biodégradées que d'autres, ce qui s'accompagne d'une création abondante d'acides organiques. Or, en milieu trop acide, la production de méthane est inhibée. Plus récente, la technologie par voie solide se développe pour les installations à la ferme traitant des substrats secs comme les fumiers, où les déjections sont mêlées à la litière. Le projet Biogaz RIO a ainsi apporté des connaissances pour aider les agriculteurs exploitant ce type de méthaniseurs à mieux gérer leur installation, notamment concernant la préparation de la matière en amont et de pilotage des digesteurs.



Microorganismes anaérobies : microorganismes qui se développent en l'absence d'oxygène.



© INRAE - B. Nicolas

Plateforme Bio2E Biotechnologie et bioraffinerie environnementales

Unité de recherche INRAE : Laboratoire de biotechnologie de l'environnement (LBE)

Démarrage : 2007

Capacité :

- 3 500 m² de laboratoires et halles expérimentales
- Équipe pluridisciplinaire de 6 personnes du laboratoire de recherche (effectif permanent : 36 personnes).

Objectifs :

- Assurer la continuité entre la recherche et l'innovation par la mise à disposition de moyens pour le transfert des résultats de la recherche académique
- Ouverture des services de la plateforme aux acteurs du monde institutionnel, académique et industriel des secteurs des biotechnologies environnementales, des bioénergies et de la valorisation de bioressources.

Outils :

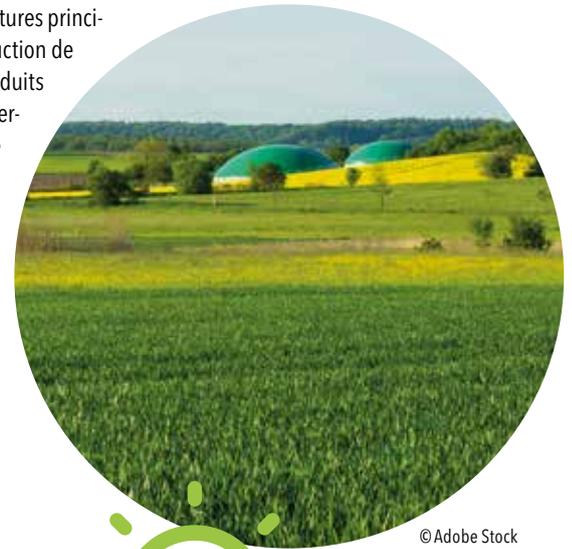
- Équipements scientifiques et analytiques pour la réalisation d'expérimentations de l'échelle du laboratoire à celle du démonstrateur industriel (méthanisation, bioréacteurs, caractérisation de la matière...)
- Recherche partenariale et collaborative, montage de projets (consortia)
- Prestations d'analyse, d'expertise et de faisabilité technologique
- Hébergement et accompagnement de start-up et laboratoires.

www6.montpellier.inrae.fr/narbonne/La-plateforme-BIO2E



Les clés d'un scénario gagnant pour l'environnement

La méthanisation a pour fonction principale de produire du combustible, voire du carburant, sous forme de gaz naturel, dit biométhane. Mais c'est aussi une voie de traitement des déchets organiques : en les utilisant, elle limite leur impact environnemental, en particulier les émissions de méthane qu'ils libéreraient dans l'atmosphère en fermentant. De plus, la production de biogaz met à disposition des agriculteurs un coproduit appelé digestat, fertilisant organique naturel qui peut être épandu sur les terres agricoles et se substituer aux engrais minéraux d'origine fossile. Dans ces conditions, quel est le bilan environnemental de la méthanisation ? À la demande de GRDF, INRAE Transfert a tenté de répondre à cette question en 2021 à travers une analyse de cycle de vie (ACV). Fondés sur 16 indicateurs, les résultats sont complexes, mais leur interprétation est sans ambiguïté sur des points importants : en méthanisant, on diminue à la fois les émissions de gaz à effet de serre et la pression sur les ressources naturelles (engrais de synthèse, etc.) quelle que soit l'origine de la matière organique. Plusieurs éléments de vigilance demeurent. Les digestats doivent être épandus dans les champs au bon moment, dans de bonnes conditions et avec le bon matériel, au risque de devenir une nuisance pour l'air (émissions d'ammoniac précurseur de particules fines) et l'eau (acidification, eutrophisation). Les conditions de culture des CIVE, implantées entre 2 cultures principales pour alimenter le méthaniseur, sont aussi à surveiller de près. Afin d'assurer une production de biomasse suffisante, les agriculteurs peuvent avoir recours à la fertilisation minérale, aux produits phytosanitaires et à l'irrigation – ce qui dégrade le bilan environnemental. Par ailleurs, dans certaines conditions une récolte tardive des CIVE peut affecter le rendement de la culture suivante (décalage de date de semis, baisse de la réserve utile en eau du sol), conduisant à un effet négatif sur la production alimentaire. Plus rassurant, l'installation d'un méthaniseur sur une exploitation agricole ne semble pas priver le sol de matière organique. En effet, « l'extraction » de carbone pour le biogaz est en général compensée par l'augmentation des flux de carbone (déchets extérieurs méthanisés) et la stabilisation du carbone résiduel du digestat au cours de la méthanisation, lequel est ensuite retourné au sol. Deux projets en cours ont pour objectif d'apporter des outils clé en main pour mieux évaluer l'impact environnemental du retour au sol des digestats : Concept-Dig (Ademe, 2021-2024) et Metha-BioSol (Min. agriculture, 2020-2023).



© Adobe Stock

Exister en tant que filière : un défi

Depuis la mise en place des tarifs d'achat en 2011, la filière française de la méthanisation se développe rapidement : le nombre de sites pratiquant l'injection de biométhane dans le réseau est passé de 1 en 2012 à 502 **I61** en décembre 2022. Les capacités d'injection atteignaient alors un potentiel de 8 833 GWh/an. Jusqu'où veut-on aller ? La loi de Transition énergétique pour la croissance verte de 2015 a fixé à 10 % la consommation de gaz renouvelable à l'horizon 2030, contre un peu moins de 1 % en 2021. Jusqu'où peut-on aller ? La croissance repose sur la capacité à mobiliser des ressources méthanisables en qualité et en quantité suffisantes, sans entraîner de compétition avec la valorisation alimentaire des produits agricoles qui doit rester prioritaire. Selon l'Ademe, il serait techniquement possible de produire 60 TWh de biométhane en 2030 et 123 TWh en 2050 (soit 25 % de la consommation actuelle...) à condition d'exploiter toutes les formes de ressources agricoles possibles telles que les résidus de cultures, les effluents d'élevage, mais aussi les cultures dédiées et les CIVE. Reste à faire exister cette filière qui, pour l'heure, agrège des modèles économiques hétérogènes. Historiquement, les méthaniseurs ont d'abord été installés par des éleveurs, ou groupements d'éleveurs et de cultivateurs, désireux de valoriser leurs déchets et de compléter leurs revenus par la revente de gaz et d'électricité à prix garanti. Ces unités autonomes représentent encore la moitié du nombre de sites pratiquant l'injection de biométhane. Attirés par les prix de rachat, certains agriculteurs ont ensuite implanté de plus grosses unités, très technologiques, pour évoluer vers le métier d'« énergiculteur ». En parallèle du monde agricole, de véritables usines ont aussi vu le jour, valorisant des déchets industriels, ménagers ou issus des stations d'épuration. De facto, la méthanisation se retrouve insérée dans différentes filières qui lui préexistent : gestion des déchets, énergie verte, agriculture. À ce défi organisationnel s'en ajoute un autre : rassurer. Les riverains sont de plus en plus réticents face à l'implantation d'un méthaniseur, inquiets des risques industriels ou de pollution des eaux, du trafic routier engendré ou encore gênés par les odeurs. Au-delà du voisinage, la filière devra aussi convaincre qu'elle saura croître en fournissant de l'énergie renouvelable sans dégrader son bilan de gaz à effet de serre et en protégeant la biodiversité. Et qu'elle saura conjuguer son développement avec la valorisation des sous-produits agricoles, sans détourner à son profit une partie des cultures dédiées à la production alimentaire.



Petits méthaniseurs pour grandes villes

Un humain sur deux est un urbain : il vit, consomme et produit des déchets en ville. Or, rien qu'en France, un tiers de ces déchets (aussi appelés biodéchets) est biodégradable (contre plus de 60 % dans les pays en voie de développement). En 2015, conscient que leur caractère organique leur conférait une valeur, le législateur a prévu que tous les Français devraient disposer d'une solution pratique de tri pour leurs biodéchets à la fin 2023. Mais pour quoi faire exactement ? Lancé dès 2016, le projet européen DECISIVE coordonné par INRAE avec 13 partenaires a exploré, entre autres pistes, celle d'un microméthaniseur urbain implanté sur le site du lycée horticole d'Ecully, en bordure du 9^e arrondissement de Lyon, à 50 m des habitations les plus proches. Entre 2020 et 2021, environ 50 t de biodéchets issus de cantines, de restaurants étoilés situés à moins de 9 km, et de la prison située à 24 km, ont terminé leur course dans un microméthaniseur pilote (il tenait dans un conteneur de 12 m de long). Conformément à la réglementation, ces déchets de cuisine étaient hygiénisés par chauffage à 70 °C pendant 1 h pour éviter tout risque sanitaire.

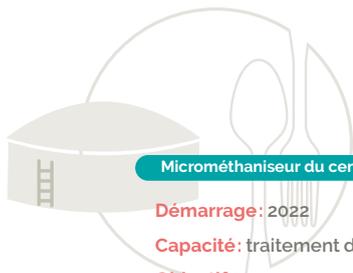
Le biogaz issu de la fermentation de cette matière organique a alimenté un moteur Stirling capable de produire de l'électricité et de la chaleur (cogénération). Dans les meilleurs jours, 90 kWh d'énergie ont été produits quotidiennement, avec une répartition maximale possible de 10 kWh pour l'électricité et 80 kWh pour la chaleur – de quoi alimenter en eau chaude à l'année une crèche ou un gymnase. Au final, il ressort de cette expérimentation : une faible emprise au sol, un fonctionnement compatible avec l'existence d'un voisinage, un dispositif flexible pouvant être mis en pause, voire déménagé à tout moment, des sous-produits liquides utilisables sur des cultures en hydroponie *, et un digestat solide pouvant servir à la culture de bacilles incorporés dans des biopesticides. Ce bilan globalement positif ne peut faire oublier que le développement de ce type d'équipement est, en France, encore limité. D'une part, car il s'agit d'une installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE) c'est-à-dire soumise à une réglementation spécifique, et d'autre part car les circuits et les modes de collecte des déchets sont à adapter à son échelle (du quartier à la petite commune).



© Adobe Stock



Hydroponie : technique de culture hors-sol qui utilise des solutions nutritives pour apporter les minéraux dont les plantes ont besoin dans l'eau douce. C'est une technique notamment utilisée en agriculture urbaine.



Microméthaniseur du centre INRAE d'Antony

Démarrage : 2022

Capacité : traitement de 5 t/an de biodéchets (15 à 20 kg/j)

Objectifs :

- Valorisation des biodéchets issus de la restauration collective du centre INRAE d'Antony dans une logique d'économie circulaire. À terme, il est prévu de valoriser le biogaz produit pour compléter l'alimentation de la chaudière du centre
- Pilote de microméthanisation dont dispose INRAE pour étudier les facteurs clés de la méthanisation à l'échelle semi-industrielle. À venir, étude de la réaction du microméthaniseur en cas de perturbation (température, acidité...)
- Valorisation d'une partie du biogaz produit pour des projets de recherche en laboratoire de l'unité PROSE (Procédés biotechnologiques au service de l'environnement).

Outils :

- Outils réglementaires de suivi du méthaniseur (suivi de la température, de la pression, analyse du gaz, de l'acidité)
- Analyse des microorganismes du digesteur
- Analyse du digestat
- Analyse et valorisation du biogaz.



Le biohydrogène

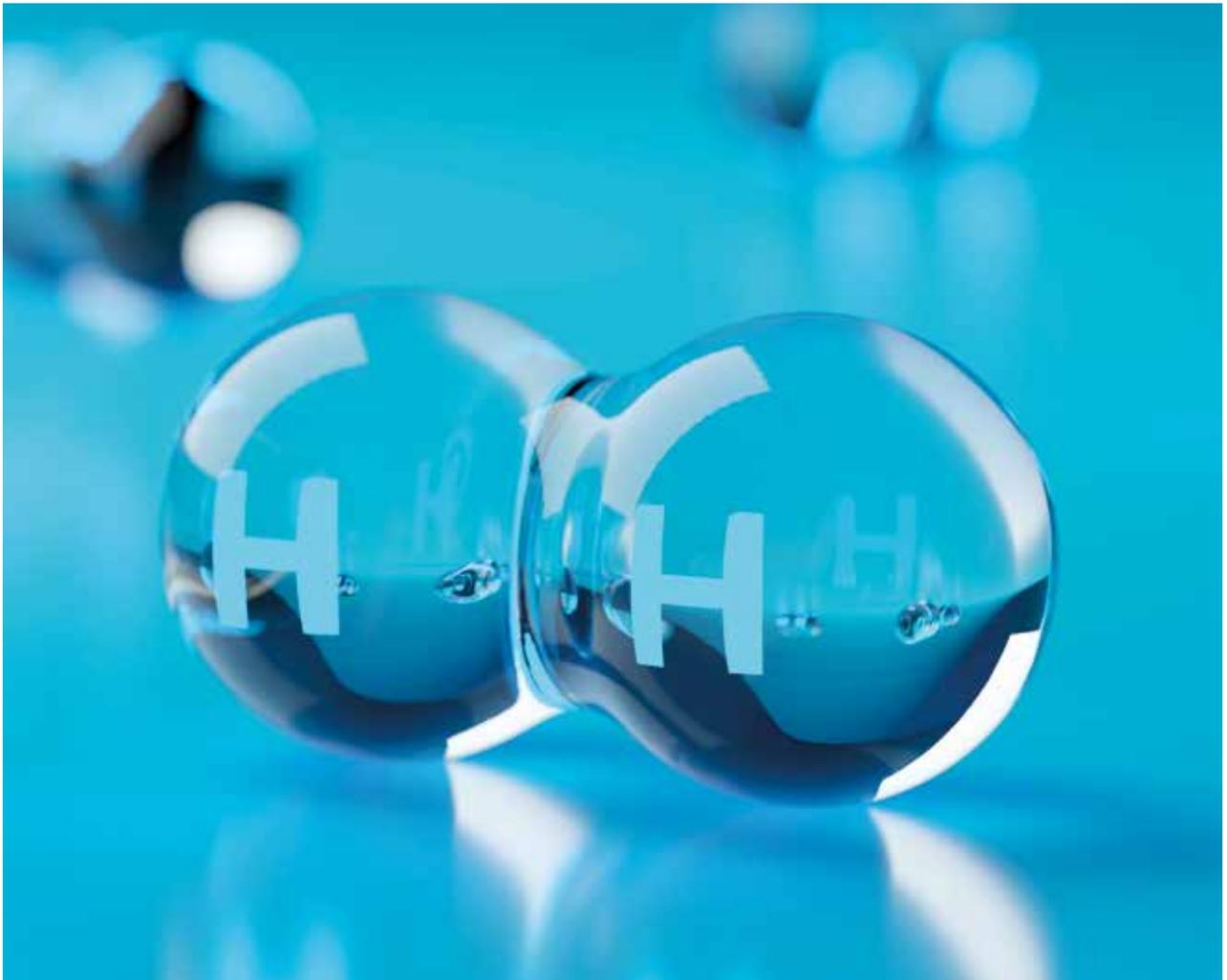
Très abondant dans l'univers mais quasi absent sur Terre, le gaz hydrogène (dihydrogène ou H₂) est actuellement fabriqué à 95 % **[7]** à partir de méthane d'origine fossile, un procédé fortement émetteur de dioxyde de carbone (CO₂). En 2021, la production des 94 millions de tonnes de H₂ produites au niveau mondial a libéré 900 millions de tonnes de CO₂ dans l'atmosphère **[8]**. Pourtant, des alternatives existent. L'électrolyse de l'eau par exemple (35 000 t de H₂ produites en 2021 **[8]**), mais aussi la génération de H₂ par le biais de microorganismes. Fort de son expertise en sciences du vivant, INRAE explore cette voie microbienne et réfléchit également à la voie inverse de fabrication de méthane à partir de dihydrogène.

94

millions de tonnes
de H₂ produites dans
le monde en 2021

[7] Analyse du cycle de vie du biométhane issu des ressources agricoles, rapport d'ACV. INRAE Transfert. Esnouf A., Brockmann D., Cresson R. (2021). Analyse du cycle de vie du biométhane issu de ressources agricoles - Rapport d'ACV. INRAE Transfert.

[8] SER, GRDF, GRTgaz, le SPEGNN et Teréga. Panorama des gaz renouvelables en 2022, p. 8-10. www.grtgaz.com/sites/default/files/2022-03/Panorama-du-gaz-renouvelable-2021.pdf

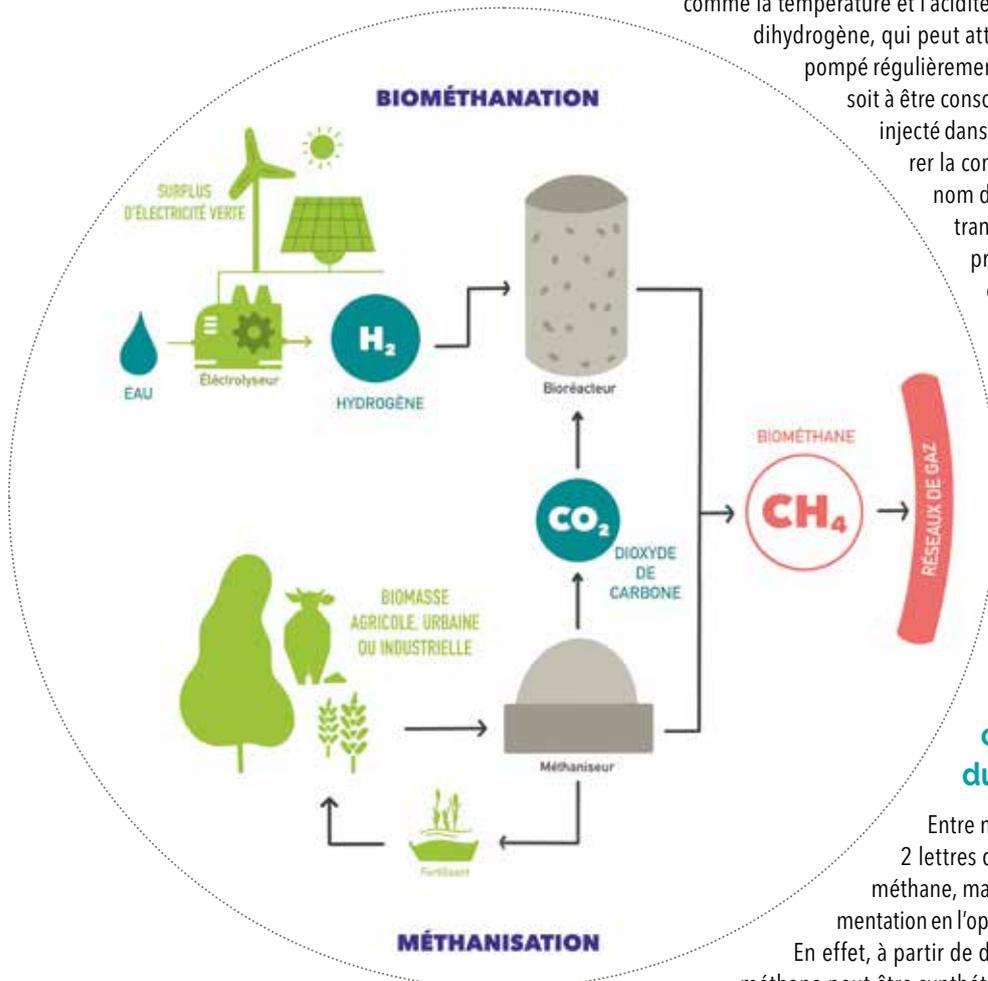


© Adobe Stock

Le biohydrogène sort du labo

Placées dans un méthaniseur, les bactéries anaérobies du type *Clostridium* consomment les glucides issus de la biomasse mise à leur disposition. L'un des premiers produits de ce festin, avant même le méthane, est le dihydrogène. Pourquoi ne pas chercher à améliorer ce processus, nommé fermentation sombre (car elle n'a pas besoin de lumière), pour accroître la quantité de H₂ libérée ? C'est tout le sens des recherches menées à INRAE. L'optimisation du procédé oblige d'abord à trouver un bon substrat, constitué de sucres faciles à digérer. Les eaux usées, les restes de restauration collective mais aussi les résidus de la viticulture semblent bien adaptés. En combinant les substrats et en évitant ceux qui sont trop riches en azote, les chercheurs tentent de trouver la formule gagnante. La composition de l'écosystème bactérien est aussi un enjeu : aux souches indigènes naturellement présentes dans les matières, on tâche d'associer des souches exogènes capables de doper les rendements. Les paramètres opératoires comme la température et l'acidité doivent être ajustés pour favoriser les réactions. Le

dihydrogène, qui peut atteindre jusqu'à 20 à 30 % du volume final, doit être pompé régulièrement car il a tendance soit à inhiber sa propre formation, soit à être consommé par le milieu bactérien. À terme, il pourra être injecté dans le réseau de gaz, à hauteur de 5 à 20 %, pour améliorer la combustion. Ce mélange méthane-hydrogène porte le nom de biohythane. Quant au liquide résiduel, il peut être transféré vers un méthaniseur classique car il a acquis des propriétés qui le rendent facilement méthanisable. En effet, la production de H₂ n'est pas pensée comme une fin en soi mais comme une voie supplémentaire de valorisation des déchets, en complément de la méthanisation. En 2024, un démonstrateur mobile, apte à être déplacé et à fonctionner en environnement industriel entrera en service.



© INRAE - M. Urtebise

La méthanation, ou comment l'électricité devient... du gaz renouvelable !

Entre méthanisation et méthanation, il y a un peu plus que 2 lettres de différence. Ces 2 opérations visent à produire du méthane, mais si la première mobilise le processus naturel de fermentation en l'optimisant, la seconde est un pur produit de la recherche.

En effet, à partir de dihydrogène (H₂) et de dioxyde de carbone (CO₂), le méthane peut être synthétisé selon 2 voies différentes. L'une, dite thermochimique, implique un chauffage jusqu'à 500 °C, une pression de 100 bars et un apport en nickel pour déclencher la réaction de synthèse. L'autre, dite biologique, est explorée par INRAE : elle nécessite l'action de microorganismes spécifiques, les archées méthanogènes, aptes à produire du biométhane à partir des 2 gaz précurseurs H₂ et CO₂. Quel intérêt puisque le dihydrogène, rare sur Terre, est actuellement coûteux et polluant à produire ? La réponse réside dans la facilité de stockage. En utilisant l'électricité excédentaire produite par le solaire ou l'éolien, il serait possible de produire par électrolyse du dihydrogène « propre » (dihydrogène renouvelable) lequel, combiné à du CO₂ issu de méthaniseurs ou de fumées industrielles, serait métabolisé en biométhane par les microorganismes. Ce méthane d'origine biologique serait beaucoup plus facile et moins coûteux à stocker que le dihydrogène. Cette voie du power-to-gas (« de l'électrique vers le gazeux ») rendrait possible un couplage très étroit des réseaux électriques et gaziers. Si un démonstrateur est mis en place en France par ENOSIS en collaboration avec INRAE, la biométhanation est encore éloignée du stade industriel. Son avenir sera intimement lié au coût du dihydrogène renouvelable, lui-même dépendant notamment de la quantité d'électricité d'origine renouvelable disponible sur le marché.



03.

© Adobe Stock



Biocarburants

36

TWh consommés
en France en 2021

En 2009 ^[9], le biocarburant est entré dans les mœurs – et dans les réservoirs – des automobilistes français. Cette année-là, les stations-services se sont enrichies d'une nouvelle offre : le SP95-E10 pour « sans-plomb indice d'octane 95 avec 10 % d'éthanol ». Tout comme le biodiesel, qui représente 78 % de la consommation nationale de biocarburants, le bioéthanol est dérivé de la biomasse ^[10]. En 2018, la France était le 1^{er} pays européen consommateur de biocarburants, avec une consommation totale de 36 TWh dont 28 pour le biodiesel et 8 pour le bioéthanol ^[11]. À elle seule, la production de bioéthanol destinée à un usage carburant mobilise environ 3 % de la surface agricole française globale de céréales et de plantes sucrières ^[12].

^[9] Biocarburants, ministère de la Transition écologique et de la cohésion des territoires, www.ecologie.gouv.fr/biocarburants

^[10] Chiffres clés des énergies renouvelables, édition 2022, ministère de la Transition énergétique, www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energies-renouvelables-2022/20-biocarburants

^[11] Baromètre biocarburants 2020, EurObserv'ER www.eurobserv-er.org/barometre-biocarburants-2020/

^[12] Chiffres clés des énergies renouvelables, édition 2019, Commissariat général au développement durable, www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-05/datalab-53-chiffres-cles-des-energies-renouvelables-edition-2019-mai2019.pdf

Le bioéthanol du futur

Faire feu de tout bois : rien n'illustre mieux la contrainte qui pèse sur la filière. Les biocarburants actuellement commercialisés, dits de 1^{re} génération, sont tirés des parties « nobles » des plantes : racines de betterave, grains de blé ou de maïs, etc. La concurrence introduite avec les cultures alimentaires a conduit en 2015 à la loi de Transition énergétique pour la croissance verte, laquelle a accordé une priorité au développement des biocarburants de 2^e génération. Ces derniers peuvent être obtenus à partir des lignocelluloses, terme générique qui décrit des biomasses riches en lignines et cellulose, 2 composants majeurs des plantes, et non consommables. Entre 2008 et 2018, INRAE a ainsi été l'un des 11 partenaires (privés et publics) associés au projet Futurol, qui visait à développer un savoir-faire français en matière de bioéthanol, une technologie conduite à son terme et désormais exploitée par la société Axens. La biomasse utilisable pour ces carburants avancés est désormais très large : on trouve aussi bien des déchets forestiers que des coupes de taillis ou encore des plantes rustiques pérennes non consommables comme le miscanthus. Le principe de la conversion vers l'éthanol est basé sur la dégradation contrôlée de la cellulose par des enzymes, afin de libérer les molécules de glucose qui la constituent, lesquelles produisent ensuite de l'éthanol par fermentation. Mais auparavant un prétraitement à la vapeur est nécessaire pour séparer la cellulose des lignines : en effet, ces dernières empêchent le bon fonctionnement des enzymes. La mise au point de ce prétraitement fut l'un des défis du projet ; il a fallu trouver les bons paramètres (température, pression, etc.), pour s'affranchir de la grande variabilité des biomasses à convertir. Le choix des souches de microorganismes et des enzymes favorisant rendement et qualité de l'éthanol produit a également été un défi majeur. L'expérience capitalisée dans le projet Futurol est aujourd'hui une base solide qui permet à INRAE de poursuivre ses recherches sur le prétraitement des biomasses lignocellulosiques et leur conversion, en particulier avec un nouveau partenaire industriel, l'Européenne de biomasse, autour de la production de pellets vapocraqués haute performance pour le chauffage au bois. À Toulouse, un biokérosène aéronautique, issu de la fermentation de ressources renouvelables par des microorganismes oléagineux, a été également développé par INRAE et ses partenaires dans un consortium tout autant emblématique que celui de Futurol : ProBio3.



© INRAE - B. Nicolas



La paille : pourquoi s'en priver ?

Lors des récoltes, il est souvent recommandé aux agriculteurs de ne ramasser qu'un tiers de la paille* et de laisser le reste au sol pour préserver le taux de carbone organique et donc la fertilité des sols. Mais en France, la paille, et plus généralement les résidus agricoles, est la ressource la plus importante pour fournir le carbone alternatif aux ressources fossiles. Les scientifiques d'INRAE ont mené une étude afin de déterminer si (et où) on pouvait utiliser les résidus de culture (dont la paille) pour notamment produire de la bioénergie (huile, gaz, biocarburants...), sans affecter les sols. Et ce, sur la base d'un retour au sol des coproduits générés comme par exemple les digestats issus de la méthanisation, ou les biochars* issus de la pyrolyse. Pour cela, les chercheurs se sont basés sur les pratiques agricoles en France métropolitaine ainsi que sur les projections climatiques de Météo France selon le scénario « RCP 4.5 » du GIEC, qui anticipent un réchauffement global de 2,2°C sur 2020-2120. Résultats : selon le procédé utilisé, on peut récolter parfois jusqu'à la totalité des résidus de culture sans affecter le taux de carbone des sols, et parfois même en l'augmentant. Cela s'explique essentiellement par le fait que les coproduits générés sont plus difficiles à dégrader par les microorganismes, en comparaison avec les résidus initiaux, ce qui favorise leur assimilation dans le sol. C'est bien sûr à nuancer selon les procédés, mais globalement les résultats montrent que l'équivalent de 20 à 63 TWh de bioénergie additionnelle par an seraient disponibles, soit pratiquement l'équivalent de la production annuelle d'électricité de l'Autriche (72 TWh). Ce serait dommage de se priver d'une telle ressource, d'autant que la majeure partie du carbone de la paille laissée au sol se dégrade en CO₂ atmosphérique.



Paille: tiges séparées des grains et laissées au sol lors de la récolte des céréales.

Biochar: coproduit issu de la pyrolyse de la biomasse ressemblant à du charbon et destiné à restaurer ou améliorer la fertilité des sols agricoles.



© Adobe Stock

Carnot 3BCAR
Bioénergies, biomolécules et matériaux biosourcés du carbone renouvelable

Démarrage: 2011

Effectif: 550 chercheurs et ingénieurs

Objectifs: le Carnot 3BCAR, réseau de R&D porté par INRAE, propose une offre de compétences intégrée et multidisciplinaire en mobilisant les biotechnologies et la chimie verte pour l'innovation des entreprises dans les domaines des bioénergies, molécules et matériaux biosourcés. Les compétences rassemblées s'étendent de la production de biomasse, la bioraffinerie, jusqu'aux propriétés fonctionnelles des molécules et matériaux issus de la biomasse. Dans le domaine des bioénergies, le Carnot 3BCAR contribue et développe des projets autour des combustibles, du biométhane, des biocarburants de 1^{er}, 2^e et 3^e générations, la pyrogazéification et du biohydrogène. Ces dernières années le Carnot 3BCAR a financé 6 projets sur les bioénergies dont 3 seront lancés en 2023.

Le label Carnot a vocation à développer la recherche partenariale, c'est-à-dire la conduite de travaux de recherche menés par des laboratoires publics en partenariat avec des acteurs socioéconomiques, principalement des entreprises (de la PME aux grands groupes), en réponse à leurs besoins.

Outils: 18 composantes réparties sur toute la France métropolitaine allant du laboratoire au pilote industriel proposant des compétences multidisciplinaires pour l'innovation des entreprises dans les domaines des bioénergies, des biomolécules et des matériaux biosourcés.

3bcar.fr/



© INRAE - C. Dupraz

04.



Agrivoltaïsme

La filière solaire photovoltaïque s'est fortement développée en France à partir de 2009 [12]. En 2021, 13,2 GW étaient installés [13]. En février 2022, le président de la République a fixé comme objectif pour 2050 une puissance installée de 100 GW [14]. Cela représente une surface de 1000 km² à déployer, soit l'équivalent de la Martinique ou de 2 fois le territoire de Belfort. Si les toits, friches industrielles et autres ombrières de parking ne suffisent pas, on peut envisager un déploiement dans les champs !

Objectif
100
GW de solaire
photovoltaïque
en 2050 pour
la France

[12] Chiffres clés des énergies renouvelables, édition 2019, Commissariat général au développement durable, www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-05/datalab-53-chiffres-cles-des-energies-renouvelables-edition-2019-mai2019.pdf

[13] Observatoire de l'énergie solaire photovoltaïque en France, France Territoire Solaire, www.les-energies-renouvelables.eu/wp-content/uploads/2016/02/Observatoire-Energie-Solaire-43eme-edition-Chiffres-T2-2022-v1-1.pdf

[14] Reprendre notre destin énergétique en main ! Présentation des orientations de la nouvelle politique énergétique de la France dans le cadre du plan France 2030. Vidéo sur www.youtube.com/watch?v=bhzVJEVPY-Y&t=1250s (à 20'50)



Des panneaux photovoltaïques dans les champs ?

Faire cohabiter panneaux photovoltaïques et plantations : et pourquoi pas ? Après tout, les cultures n'interceptent que le tiers de l'énergie solaire incidente, ce qui laisse largement de quoi produire de l'électricité. De façon pionnière, entre 2009 et 2022, INRAE a conduit les programmes Sun'Agri 1, 2 et 3 en partenariat avec la société Sun'R, en inventant au passage le mot « agrivoltaïsme » pour désigner cette synergie entre production agricole et électrique. Non loin de Montpellier, un prototype a été mis en place en 2010, avec une parcelle témoin pour évaluer l'impact sur les cultures. Les expérimentations y ont dégagé 3 précieux enseignements. Premièrement, que l'installation des panneaux à des hauteurs de 4 à 5 m était compatible avec le passage des engins agricoles. Deuxièmement, qu'une adaptation de la densité des panneaux était nécessaire pour conserver une bonne exposition au soleil à certains stades clés de la croissance des cultures – grosso modo, il en faut 2 fois moins que dans une ferme photovoltaïque classique. Enfin, que la mobilité des panneaux, avec 1 ou 2 axes possibles de rotation, était une amélioration essentielle, non seulement pour moduler la quantité d'ombre, mais aussi pour offrir une protection contre les excès climatiques (grêle, gel et surtout canicule et sécheresse), y compris la nuit. Si la définition stricte du terme fait encore débat, l'agrivoltaïsme doit être bien plus que le déploiement de panneaux au sol, où la dimension agricole se cantonnerait à une activité réduite, apiculture ou entretien par du pâturage ovin. Dans sa forme la plus ambitieuse, dite dynamique, les panneaux sont pilotés comme une persienne par un logiciel d'aide à la décision qui prend en compte les besoins des plantes. Désormais très sollicités par des partenaires industriels désireux de nouer des collaborations, les chercheurs d'INRAE restent vigilants pour que leur travail ne soit pas dévoyé de l'objectif premier : maintenir ou améliorer la production agricole, tout en produisant de l'énergie électrique.



Agrivoltaïsme et viticulture : le projet VitiSolar

Durée : 2022-2026

Partenaire : EDF Renouvelables, Ampex, université de Bordeaux, chambre d'agriculture de la Gironde, fédération régionale des CUMA (coopérative d'utilisation en commun de matériel agricole).

Capacité : structure de panneaux photovoltaïques surélevés et orientables situés sur une parcelle de vignes de merlot de 2 000 m² sur le domaine INRAE de la Grande Ferrade à Villenave-d'Ornon.

Objectifs : évaluer les impacts de panneaux photovoltaïques sur le microclimat et la plante (développement et croissance, besoins en eau,

maladies, qualité du raisin), la biodiversité et la protection qu'ils peuvent apporter en cas d'intempéries ou de sécheresse, la compatibilité avec les engins agricoles, la durabilité agronomique et économique...

Outils : 2 x 8 rangs de vigne équipés de panneaux solaires et autant servant de témoin; diverses méthodologies mises en œuvre pour l'expérimentation et la modélisation; plusieurs modèles INRAE et EDF, existants ou en développement; divers capteurs classiques ou innovants en micrométéorologie et écophysiologie, épidémiologie...



Agrivoltaïsme et élevage : le dispositif Camélia

Durée : 2022-2025

Lieu : Herbipôle de Laqueille (64)

Partenaire : ENGIE Green

Capacité : 252 panneaux photovoltaïques verticaux bifaces répartis sur une prairie permanente de 1 ha, pour une production électrique jusqu'à 100 MWh par an.

Objectifs :

- Mesurer les effets de l'installation photovoltaïque sur le microclimat aérien et souterrain, la croissance, la production et la qualité du fourrage, ainsi que la fertilité et les stocks de carbone du sol
- Étudier le comportement des bovins et la compatibilité des structures verticales avec l'utilisation d'engins agricoles
- Évaluer les effets sur la biodiversité
- Modéliser la production énergétique de ce type d'installation solaire.

Outils : plus de 50 capteurs agronomiques et météorologiques pour mesurer les effets de l'installation photovoltaïque. Observation du comportement des bovins.



Agriphotovoltaïsme de plein champ : démonstrateur sur la luzerne – Site EDF de La Renardière

Durée : 2019-2024

Partenaire : EDF Renouvelables, EDF R&D

Capacité : parcelle de 1 200 m² sous 384 panneaux photovoltaïques d'une puissance de 115 kWc *

Objectifs : étudier les effets de l'association de panneaux photovoltaïques et d'une culture de luzerne sur les productions de biomasse et d'électricité.

Outils :

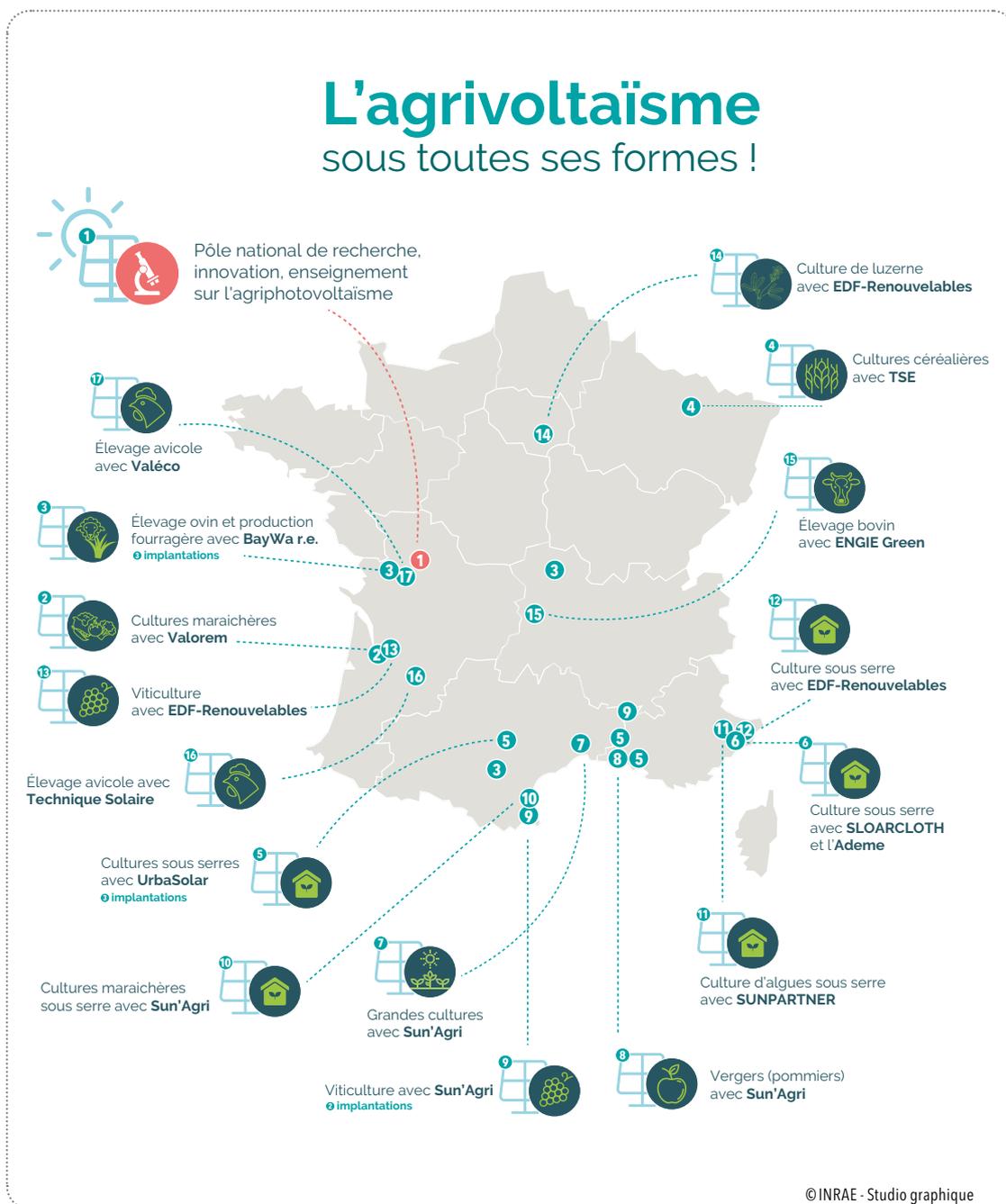
- Analyse de la production agricole sur la base de 3 coupes par an
- Analyse et suivi du microclimat de la parcelle
- Pilotage des panneaux photovoltaïques pour adapter le rayonnement reçu par les plantes et la production d'électricité.



Watt-Crête (Wc) : valeur indiquant la puissance maximale de production d'un panneau photovoltaïque.

L'agrivoltaïsme sous toutes ses formes !

INRAE, un des pionniers dans les recherches sur l'agrivoltaïsme, accompagne de nombreux projets de recherches public-privés avec de nombreuses entreprises du secteur énergétique et spécialistes du photovoltaïque. L'objectif est toujours de s'assurer que les projets d'agrivoltaïsme répondent avant tout à une problématique agricole pour avoir une véritable synergie entre production alimentaire et production d'énergie. Dans cette optique, INRAE met en place et coordonne le Pôle national de recherche et d'innovation en agrivoltaïsme basé sur son centre Nouvelle-Aquitaine-Poitiers à Lusignan. Cette carte présente les projets de démonstrateurs auxquels INRAE est associé et dont l'énergie produite sert directement aux exploitations ou est réinjectée dans le réseau.





05.

© Adobe Stock



Sobriété énergétique

Parce que les énergies fossiles sont à l'origine du réchauffement global de l'atmosphère et aussi parce que leur coût, lié à l'épuisement progressif de cette ressource, devient prohibitif, il faut en réduire la consommation. L'équation est complexe car les énergies fossiles restent encore vitales pour les systèmes agricoles et alimentaires. La sobriété énergétique n'est donc pas une option, mais bel et bien un objectif prioritaire.

Au champ, mettre la pédale douce sur les fossiles

L'agriculture est un cas d'école : en France, 87 % de ses émissions de gaz à effet de serre n'ont rien à voir avec le CO₂ issu de la consommation d'énergie fossile, le secteur étant surtout émetteur de méthane et de protoxyde d'azote. Avec 4,5 millions TEP (tonne équivalent pétrole) consommées par an, l'agriculture ne représente que 2 % des émissions françaises directes liée à la consommation d'énergie, essentiellement pour faire tourner les engins agricoles (75 %) et chauffer les bâtiments d'élevage et les serres (25 %). En revanche, la fabrication des intrants que sont les engrais azotés minéraux et les pesticides est très dépendante des hydrocarbures, et l'agriculture se trouve donc exposée indirectement lorsque le cours de ces combustibles augmente. Or les études sur la consommation directe et indirecte d'énergie en agriculture sont rares car complexes. Grâce à des compteurs spécifiques, on sait mesurer la dépense énergétique, pour un engin agricole, d'une heure de labour ou de moisson – INRAE a d'ailleurs conduit des recherches en ce sens à travers les projets CASDAR EnergieTic (2009-2011), puis EDEN (2012-2014). Mais quantifier la consommation énergétique d'un système de culture, lequel combine de nombreuses opérations (travail du sol, semis, fertilisation, irrigation, récolte, etc.), est plus délicat : dans un système avec labour, par exemple, on va utiliser plus de gazole (consommation directe) mais moins d'herbicides (consommation indirecte). Toutes les opérations sont en interaction les unes avec les autres, et ces liens ont été peu observés du point de vue énergétique. Par ailleurs, conjuguer des objectifs multiples et parfois antagonistes s'avère difficile, notamment quand il s'agit de réduire conjointement l'utilisation d'énergie et de pesticides en agriculture. Une certitude : la réduction du recours à l'énergie fossile sera un enjeu majeur pour la mise au point de systèmes plus sobres à l'avenir, et devient une thématique de recherche d'importance pour les années à venir.



© INRAE - B. Nicolas



© Adobe Stock

Froid : comment en produire plus avec moins ?

C'est une donnée qui fait frissonner : la production de froid est responsable de 10 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Refroidir conduit donc à réchauffer l'atmosphère. Or notre économie mondialisée et l'impératif de sécurité alimentaire est incapable de se priver de cette technologie. Environ 60 % des aliments que nous consommons sont, à un moment ou un autre, réfrigérés ou congelés. Et aucune baisse n'est prévue, bien au contraire. La part du froid dans la consommation mondiale d'électricité, aujourd'hui égale à 20 %, pourrait doubler d'ici 2050, essentiellement pour conserver nos aliments (70 % des besoins) mais aussi faire tourner nos climatiseurs. INRAE conduit des recherches dans plusieurs directions, en particulier la réduction des quantités de fluides frigorigènes nécessaires. Il s'agit par exemple de transporter le froid par d'autres types de fluides, dits frigoporteurs, dont l'incidence sur l'effet de serre est beaucoup moins marquée. On peut également intégrer des matériaux à changement de phase dans certains équipements, tels que les vitrines de magasin, afin de stocker l'énergie thermique en heures creuses et restituer du froid en heures pleines sans consommer d'électricité (flexibilité énergétique). Les solutions ne sont pas exclusivement techniques. Sachant que le développement de microbes pathogènes est bloqué en dessous de -10 °C, il est envisagé d'assouplir la réglementation qui, en général, impose une température de référence maximum de -18 °C dans la chaîne du froid des produits surgelés. Or chaque degré gagné réduit la consommation électrique d'environ 3 %. La dimension sociotechnique de la chaîne du froid doit aussi être mieux explorée et comprise à la lumière des sciences humaines. En effet, une innovation ne s'impose jamais d'elle-même, mais parce que l'ensemble des acteurs et organisations impliqués s'est mis d'accord sur son emploi.



Procédés de transformation du lait : la science allège les factures

Économiser l'énergie et l'eau constitue une préoccupation de toujours pour les industriels de l'agroalimentaire. Dans le secteur laitier, elle s'est déjà traduite par la réduction des temps de nettoyage ou de ventilation des hâloirs de fromageries. Aujourd'hui, les marges de manœuvre sont faibles si on ne remet pas à plat la conception et le mode opératoire des équipements en prenant en compte l'ensemble des objectifs prioritaires de l'industriel (amélioration des qualités nutritionnelles ou sensorielles, accroissement du rendement, baisse des coûts de fonctionnement, etc.). Comment s'assurer, par exemple, que la baisse d'une température de traitement thermique, diminuant la consommation énergétique, n'impacte pas la qualité sanitaire d'un produit ou ne dénature pas son goût ou son apparence ? INRAE s'est penché en particulier sur 2 procédés majeurs du secteur : la filtration du lait et sa transformation en poudre. Le procédé actuel de séchage, qui comprend une étape de concentration par évaporation, est très énergivore. En adaptant à l'industrie laitière un logiciel de simulation de procédé largement utilisé dans le secteur chimique (avec ses 2 000 molécules, le lait est beaucoup plus complexe que les produits chimiques), les chercheurs sont parvenus à dégager des compromis possibles en matière de conception et de conduite opératoire de l'évaporateur. Cette optimisation est dite multiobjectif car elle ne prend pas seulement en compte les questions d'énergie mais l'ensemble des objectifs à atteindre. Elle permet également aux industriels de choisir la source d'énergie pour produire la vapeur (fioul, gaz, plaquettes de bois) la mieux adaptée à leurs attentes. Une autre recherche a été conduite sur la microfiltration du lait, un procédé qui permet d'obtenir des concentrés de protéines, en amont du séchage. Cette fois, ce sont des connaissances issues des expériences d'experts qui ont été recueillies, formalisées, puis traitées mathématiquement pour faire émerger des solutions nouvelles. Codéveloppé et cofinancé par l'équipementier français Boccard, l'outil logiciel qui découle de ces travaux est désormais utilisé par ce dernier.



© Adobe Stock

Le bel avenir des ferments

Le pain, le fromage, les yaourts, le vin, la bière... mais aussi la choucroute, le saucisson, le thé, le café, le chocolat, les olives... À un moment ou un autre, chacun de ces aliments a subi une fermentation. Un processus par lequel un microorganisme, bactérie ou levure, consomme les sucres de l'aliment dans lequel il est présent naturellement et, en retour, produit un acide, un alcool ou un gaz. Maîtrisée, la fermentation enrichit les goûts, améliore les profils nutritionnels, et offre une protection contre d'autres microorganismes, indésirables ceux-là. Mieux encore : elle permet de conserver des produits finis à température ambiante, sans besoin de froid, et ne produit en guise de déchets que des résidus organiques qui peuvent être valorisés. Il s'agit donc d'un procédé naturel de transformation qui peut fortement contribuer aux transitions vers une alimentation plus saine, plus sûre et plus durable. Par exemple, on sait que les produits à base de légumineuses, riches en protéines, peinent à séduire les consommateurs du fait de leur goût jugé trop « végétal ». Ce verrou sensoriel pourrait sauter grâce à la fermentation et sa capacité à transformer les saveurs. Si des légumineuses fermentées pouvaient en partie se substituer à la viande, aliment dont la production est gourmande en terres, en eau et source de gaz à effet de serre, l'environnement en serait directement amélioré. Les ferments représentent donc un enjeu stratégique majeur, au point que le gouvernement a lancé en septembre 2022 le Grand défi Ferments du Futur, piloté par INRAE et son partenaire l'Association nationale des industries alimentaires (ANIA). Si les objectifs les plus visibles sont la naturalité et la santé, la recherche de procédés écoresponsables est loin d'être absente. Il s'agit notamment d'optimiser la gestion de l'eau, de l'énergie et des déchets dans les procédés de fermentation. Pour son premier appel à projets lancé en 2023, le consortium d'acteurs publics (dont INRAE) et privés en charge de leur sélection a déjà privilégié 4 axes :

1. la diversification des ferments, avec le besoin d'identifier de nouveaux microorganismes ;
2. la compréhension des liens entre fermentation et microbiote ;
3. la capacité de l'intelligence artificielle à prédire quels ferments sont les mieux adaptés à l'obtention de telle ou telle fonctionnalité ;
4. et, bien entendu, la mise au point de procédés de fermentation innovants et économes en énergie.



© Adobe Stock

Vers des stations d'épuration moins énergivores

Dans les pays de l'Europe, l'assainissement des eaux résiduaires urbaines représente moins de 1,5 % de la consommation nationale d'électricité. Cela paraît peu pour une activité aussi vitale, mais à l'échelle des collectivités il en va tout autrement. Le traitement des eaux résiduaires urbaines représente en moyenne 20 % de la consommation électrique des services publics locaux, ce qui en fait le premier poste de dépense énergétique, devant les écoles et les hôpitaux. Alors que les tarifs de l'énergie flambent, les collectivités ont tout intérêt à regarder dans le détail la consommation de leurs stations d'épuration. Le premier gisement d'économie possible concerne le traitement biologique, lequel consiste à apporter de l'oxygène aux bactéries aérobies pour leur permettre de dégrader les matières organiques contenues dans les eaux résiduaires. Ce traitement pèse jusqu'à 75 % de l'énergie consommée par une station d'épuration et INRAE conduit plusieurs projets de recherche pour optimiser cette étape, voire la remplacer par des procédés moins énergivores. En parallèle des économies, les collectivités ont tout intérêt à regarder leurs eaux usées comme une ressource. Il a été calculé qu'on pourrait y récupérer 6 à 9 fois l'équivalent en énergie de ce qu'on dépense pour les traiter. Sous forme thermique, puisqu'elles sont chaudes (autour de 15-20°C) et peuvent être utilisées directement grâce à des échangeurs de chaleur disposés dans les réseaux d'assainissement, pour chauffer des équipements collectifs comme les piscines municipales, ou indirectement grâce à des pompes à chaleur installées sur les stations d'épuration. Mais aussi comme ressource, puisque les boues d'épuration contenant la matière organique des eaux usées peuvent être méthanisées pour produire du biogaz ou, après déshydratation, être incinérées, par exemple avec les ordures ménagères, dans une synergie entre services territoriaux. Les travaux d'INRAE ambitionnent la compréhension et l'optimisation des procédés unitaires, comme la méthanisation, mais aussi de l'ensemble des filières de valorisation/traitement, à l'aide notamment d'outils de modélisation numérique représentant les différentes étapes requises et leur couplage. Reste que la meilleure manière de limiter la consommation d'énergie consiste, dès la conception, à éviter le surdimensionnement des installations : en moyenne, les stations d'épuration de plus de 2 000 équivalent-habitants fonctionnent à 50 % de leur potentiel. Même si cela se justifie dans certaines zones où la population varie fortement au cours de l'année (zones touristiques par exemple).



© Fotolia



Glossaire

Biochar: coproduit issu de la pyrolyse de la biomasse ressemblant à du charbon et destiné à restaurer ou améliorer la fertiliser des sols agricoles.

Digestat: ce sont les résidus, ou déchets « digérés », issus de la méthanisation des déchets organiques.

Hydroponie: technique de culture hors-sol qui utilise des solutions nutritives pour apporter les minéraux dont les plantes ont besoin dans l'eau douce. C'est une technique notamment utilisée en agriculture urbaine.

Méthaniseur: aussi appelé digesteur, il s'agit d'un réacteur dans lequel la matière organique est dégradée par des microorganismes en l'absence d'oxygène, ce qui conduit à la formation de biogaz (mélange de méthane, de CO₂ et de quelques gaz traces) et d'un produit solide riche en matière organique, le digestat.

Microorganismes anaérobies: microorganismes qui se développent en l'absence d'oxygène.

Paille: tiges séparées des grains et laissées au sol lors de la récolte des céréales.

Pellets: aussi appelés granulés de bois, il s'agit d'un combustible pour les poêles, inserts ou chaudières à pellets produits essentiellement à partir de résidus des scieries comme la sciure et les copeaux.

Puits de carbone: la capacité des arbres à absorber et stocker du CO₂ durant leur croissance fait d'eux des « puits de carbone ».

Watt-Crête (Wc): valeur indiquant la puissance maximale de production d'un panneau photovoltaïque.



Contacts scientifiques

Coordinatrice scientifique

Monique Axelos / monique.axelos@inrae.fr

Directrice scientifique Alimentation et Bioéconomie

01. Le bois, source d'énergie

Dans la chaîne du bois tout se tient

Antonello Lobianco / antonello.lobianco@inrae.fr

UMR BETA / Dpt ECOSOCIO / INRAE Grand Est-Nancy

Cartographie des ressources : le salut vient du ciel

Frédéric Berger / frederic.berger.2@inrae.fr

UR LESSEM / Dpts ACT et ECODIV /

INRAE Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes

Pour les bûcherons, une boîte à outils... numérique !

Nathalie Korboulewsky / nathalie.korboulewsky@inrae.fr

UR EFNO / Dpt ECODIV / INRAE Val-de-Loire

Coupes rases : des effets négatifs à atténuer

Laurent Augusto / laurent.augusto@inrae.fr

UMR ISPA / Dpt ECODIV / INRAE Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux

02. Produire des gaz renouvelables

Aider les méthaniseurs à carburer plein gaz

Nicolas Bernet / nicolas.bernet@inrae.fr

UR LBE / Dpts TRANSFORM et MICA /

INRAE Occitanie-Montpellier

Les clés d'un scénario gagnant pour l'environnement

Florent Levavasseur / florent.levavasseur@inrae.fr

UMR ECOSYS / Dpt AGROECOSYSTEM /

INRAE Île-de-France-Versailles-Saclay

Exister en tant que filière : un défi

Thomas Nesme / thomas.nesme@inrae.fr

UMR ISPA / Dpt AGROECOSYSTEM /

INRAE Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux

Petits méthaniseurs pour grandes villes

Anne Tremier / anne.tremier@inrae.fr

UR OPAALE / Dpt TRANSFORM / INRAE Bretagne-Normandie

Le biohydrogène sort du labo

Eric Trably / eric.trably@inrae.fr

UR LBE / Dpts TRANSFORM et MICA /

INRAE Occitanie-Montpellier

La méthanation, ou comment l'électricité devient... du gaz renouvelable !

Renaud Escudie / renaud.escudie@inrae.fr

UR LBE / Dpts TRANSFORM et MICA /

INRAE Occitanie-Montpellier

03. Biocarburants

Le bioéthanol du futur

Bernard Kurek / bernard.kurek@inrae.fr

UMR FARE / Dpts TRANSFORM et AGROECOSYSTEM /

INRAE Grand-Est Nancy

La paille : pourquoi s'en priver ?

Lorie Hamelin / lorie.hamelin@insa-toulouse.fr

UMR TBI / Dpt TRANSFORM / INRAE Occitanie-Toulouse

04. Agrivoltaïsme

Des panneaux photovoltaïques dans les champs ?

Christian Dupraz / christian.dupraz@inrae.fr

UMR ABSys / Dpt AGROECOSYSTEM /

INRAE Occitanie-Montpellier

05. Sobriété énergétique

Au champ, mettre la pédale douce sur les fossiles

Thomas Nesme / thomas.nesme@inrae.fr

UMR ISPA / Dpt AGROECOSYSTEM /

INRAE Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux

Froid : comment produire plus avec moins ?

Anthony Delahaye / anthony.delahaye@inrae.fr

Laurence Fournaison / laurence.fournaison@inrae.fr

UR FRISE / Dpt TRANSFORM /

INRAE Île-de-France-Jouy-en-Josas-Antony

Procédés de transformation du lait : la science allège les factures

Geneviève Gesan-Guiziou /

genevieve.gesan-guiziou@inrae.fr

UMR STLO / Dpts TFRANSFORM et MICA /

INRAE Bretagne-Normandie

Le bel avenir des ferments

Damien Paineau / damien.paineau@inrae.fr

INRAE Transfert

Jean-Philippe Steyer / jean-philippe.steyer@inrae.fr

UR LBE / Dpts TRANSFORM et MICA /

INRAE Occitanie-Montpellier

Vers des stations d'épuration moins énergivores

Sylvie Gillot / sylvie.gillot@inrae.fr

UR REVERSAAL / Dpt TRANSFORM /

INRAE Auvergne-Rhône-Alpes-Lyon-Grenoble



Dpt / Département scientifique

UMR / Unité mixte de recherche

UR / Unité de recherche

Conception/rédaction :

Service de presse - INRAE Direction de la communication
Olivier Voizeux (rédaction)

Coordinatrice scientifique :

Monique Axelos, directrice scientifique Alimentation
& Bioéconomie d'INRAE

Conception graphique :

Studio graphique - INRAE Direction de la communication

Photo : © Adobe Stock



Centre-siège Paris-Antony
Service Presse
Tél. : +33 (0)1 42 75 91 86
presse@inrae.fr

Rejoignez-nous sur :



[inrae.fr/presse](https://www.inrae.fr/presse)

**Institut national de recherche pour
l'agriculture, l'alimentation et l'environnement**



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE