



HAL
open science

Agriculture et forêts, sources d'énergie

Thierry Caquet, Christian Huygue, Pierre Renault, Monique Axelos, Pascale Mollier

► **To cite this version:**

Thierry Caquet, Christian Huygue, Pierre Renault, Monique Axelos, Pascale Mollier. Agriculture et forêts, sources d'énergie. "Ressources" n°5, la revue INRAE, 5, pp.12-43, 2024, 10.17180/dprm-wr23 . hal-04523747

HAL Id: hal-04523747

<https://hal.inrae.fr/hal-04523747>

Submitted on 11 Apr 2024

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.

Copyright

AGRICULTURE ET FORÊTS, SOURCES D'ÉNERGIE

La contribution du secteur des terres (agriculture, forêts et sols) est essentielle dans tous les scénarios de neutralité carbone à long terme, notamment pour décarboner le secteur de l'énergie. Au-delà des idées reçues, faisons le point sur les vraies perspectives d'un secteur majeur pour la stratégie française énergétique et bas-carbone.



DÉCARBONER L'ÉNERGIE

La limite des réserves en énergies fossiles et leur impact environnemental imposent une transition de nos sociétés vers des fonctionnements moins énergivores et des énergies dites renouvelables afin de limiter nos émissions de gaz à effet de serre (GES).

Focus sur la stratégie française.

À l'échelle mondiale, la consommation d'énergies fossiles (charbon, gaz naturel, pétrole) est la première source d'émissions de CO₂ (environ 80 %), loin devant 2 autres sources : le changement d'usage des terres et plus particulièrement la déforestation, massive dans certaines régions du monde, et la production de ciment. De fait, le bouquet énergétique mondial repose largement sur les énergies fossiles. Leur consommation dans les différents secteurs d'activité – transport, bâtiment, industrie, agriculture – ne fait que croître, alors que la part des énergies renouvelables (EnR) dites décarbonées (hydroélectricité, éolien, solaire, biomasse-énergie) reste très minoritaire, même si elle progresse. Entre 1995 et 2018 dans le monde, la consommation de charbon a augmenté 12 fois plus que le solaire et 5 fois plus que l'éolien. Et surtout, les énergies renouvelables ne se substituent pas aux énergies fossiles : elles s'y ajoutent pour combler des besoins en énergie toujours croissants (voir figure du haut, p. 15).

Objectif neutralité carbone en 2050

À rebours de cette dynamique, l'Europe a élaboré une stratégie dans laquelle les énergies bas-car-

BIOMASSE ÉNERGIE

Part des produits issus de l'agriculture, de la forêt, de la mer et des industries connexes utilisée à des fins de production d'énergie soit directement, soit après transformations au travers de la méthanisation, de la production de biocarburants, etc.

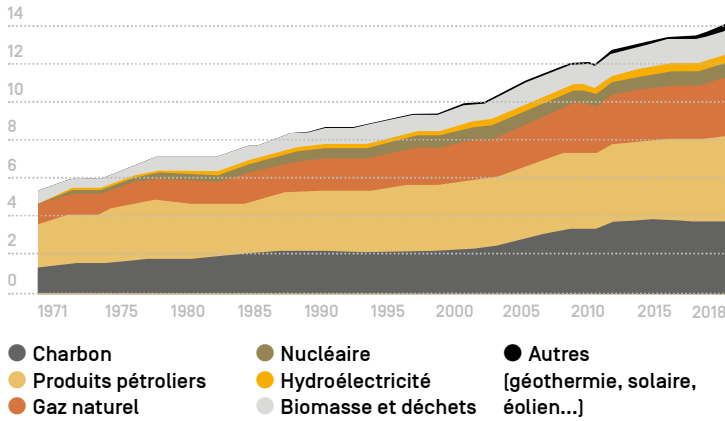
Elle englobe des cultures dédiées et des résidus de culture, des effluents d'élevage, du bois et une part de déchets industriels et ménagers.

bone, au lieu de s'ajouter, se substituent aux énergies fossiles, avec pour objectif ambitieux d'atteindre la neutralité carbone en 2050. La neutralité carbone ne signifie pas l'arrêt total des émissions de GES, mais leur réduction maximale et leur compensation par des absorptions équivalentes, avec, au final, un « zéro émission nette » de GES. C'est l'objectif visé en 2050, l'Europe ayant l'ambition d'être « le premier continent climatiquement neutre du monde ».

La position française

Pour la France, la réduction des émissions de GES à atteindre en 2050 a été calculée en tenant compte des émissions jugées non évitables pour préserver les activités humaines vitales. Cette réduction suppose un effort très conséquent, puisqu'il s'agit de diviser par 5 les émissions de 2021 pour les différents secteurs d'activité. Les transports représentent 31 % de ces émissions, l'agriculture 18 %, l'industrie 19 %, le bâtiment 18 %, l'énergie (production, transformation, distribution) 10 % et le traitement des déchets 4 %¹. Comme ces émissions proviennent essentiellement de l'utilisation d'énergies fossiles, la décar-

UNE CONSOMMATION MONDIALE D'ÉNERGIE PRIMAIRE EN CONSTANTE AUGMENTATION (EN GETP ¹)



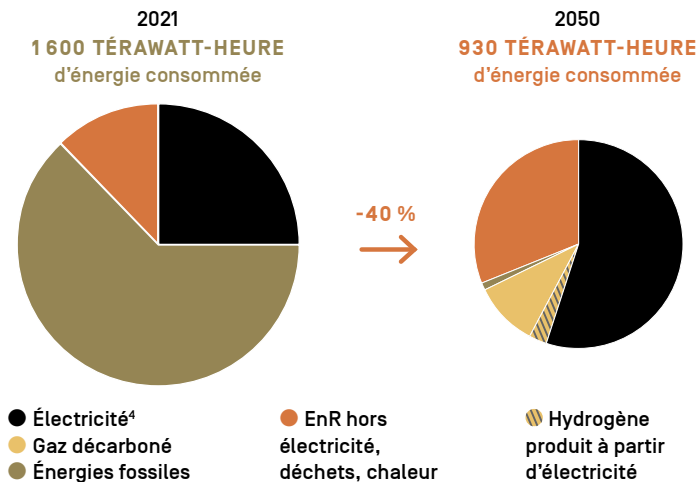
1. Gtep : milliard de tonnes équivalent pétrole
Source : calculs SDES, d'après les données de l'AIE

UN BILAN CARBONE À 30 ANS DE L'OBJECTIF

	En 2021	Objectif de la SNBC-2 en 2050
Absorptions nettes secteur UTCATF ²	17,1 MTCO ₂ EQ ³	80 MTCO ₂ EQ
Émissions nettes des autres secteurs	414,8 MTCO ₂ EQ	80 MTCO ₂ EQ

2. secteur UTCATF = lié à l'agriculture et à la forêt (changement d'affectation compris)
3. MtCO₂eq : million de tonnes équivalent CO₂

CONSOMMATION D'ÉNERGIE EN FRANCE, ENTRE ENJEU ET RÉALITÉ



4. Consommation finale d'électricité (hors pertes, hors consommation issue du secteur de l'énergie et hors consommation pour la production d'hydrogène).
Consommation intérieure d'électricité dans la trajectoire de référence de RTE = 645 TWh

bonation de l'énergie est, après la réduction des consommations, le levier essentiel à actionner pour parvenir à l'objectif de neutralité carbone. Parallèlement, il faut veiller à compenser les émissions par un niveau d'absorption équivalent, en préservant et en développant les puits de carbone (forêts, prairies permanentes, sols agricoles), ce qui entraîne des contraintes supplémentaires. Le défi est donc de taille!

La Stratégie nationale bas-carbone (SNBC), révisable tous les 5 ans, établit un calendrier de réduction des émissions de GES. La SNBC-2, datée de 2018, prévoit un rythme de réduction des émissions de GES de 3 à 4%, sur la période 2022-2030, afin d'atteindre la neutralité carbone (zéro émission nette) en 2050. La SNBC-3, en cours de définition, devrait prendre en compte le nouvel objectif européen de réduction de 55% des émissions nettes de GES par an par rapport à 1990, dès 2030, tout en adaptant les scénarios au contexte climatique et géopolitique (prix de l'énergie, souveraineté alimentaire et industrielle, inflation, etc.)².

Énergies décarbonées ou bas-carbone, énergies renouvelables, de quoi parle-t-on ?

Les énergies dites décarbonées ou bas-carbone englobent les énergies solaire, éolienne et hydraulique, la géothermie, l'énergie nucléaire et l'énergie issue de la biomasse : bois-énergie, biocarburants et biogaz. En effet, l'utilisation de ces énergies n'émet pas ou peu de GES.

L'énergie issue de la biomasse provient essentiellement de l'exploitation des cultures et des forêts. Son bilan carbone est considéré comme neutre à condition que le rythme de renouvellement de la biomasse puisse soutenir la consommation. Il faut en particulier laisser aux forêts le temps de se régénérer. Au contraire, l'utilisation d'énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) libère des stocks de carbone accumulés depuis des millions d'années dans des végétaux (pour le charbon) ou du plancton (pour le pétrole) qui ne pourront pas être reconstitués. L'impact sur le changement climatique de ces énergies fossiles est donc bien supérieur en termes d'émissions nettes.

Les énergies décarbonées, exceptée l'énergie nucléaire, sont renouvelables (EnR), car leurs sources ne sont pas en quantité limitée (soleil, vent, eau) ou sont reconstituables à l'échelle hu- →

3 leviers : sobriété, efficacité énergétique, électricité doublée et décarbonée.

maine (biomasse). Une nuance doit cependant être apportée pour l'énergie hydraulique : si la quantité totale d'eau sur Terre est importante et constante, sa distribution dans l'espace et le temps subit les effets du changement climatique. Demain, certaines usines hydroélectriques pourraient être mises en difficulté si le débit des cours d'eau qui les alimentent diminue trop drastiquement.

L'énergie nucléaire n'est pas renouvelable car elle est basée sur des minerais (uranium) en quantité limitée, mais une partie des combustibles peut être réutilisée pour produire de l'électricité.

Les axes majeurs de la stratégie française

La stratégie énergétique de la France pour décarboner l'énergie (SNBC-2)⁵ vise à diminuer la consommation d'énergie totale de 40 % en 2050 (voir figure du milieu p. 15). Cet objectif devra mobiliser 2 leviers : d'une part, la sobriété énergétique, qui sera fortement encouragée, et, d'autre part, l'augmentation de l'efficacité énergétique par différents moyens : renouvellement des appareils de chauffage, bâtiments mieux isolés et procédés plus efficaces. Les pompes à chaleur par exemple sont 3 fois plus efficaces que les chaudières classiques. Les moteurs électriques sont 2 à 3 fois plus efficaces que les moteurs thermiques, mais il faut prendre en compte l'origine de cette électricité (voir encadré sur l'électricité, p. 17).

La part de l'électricité dans la consommation d'énergie finale doit passer de 25 à 55 %. Cette électricité sera essentiellement d'origine solaire, éolienne et hydraulique, complétée par une part d'énergie nucléaire variable selon les choix politiques. L'énergie hors électricité est fournie essentiellement par la biomasse : bois-énergie (chauffage essentiellement), biocarburants et biogaz. Le thermique solaire et la géothermie sont

ÉNERGIE PRIMAIRE

C'est l'énergie brute produite à partir de la nature. Elle est ensuite transformée, transportée, distribuée, stockée, pour fournir l'énergie finale utilisable par le consommateur.

BOIS-ÉNERGIE

Il désigne l'utilisation du bois en tant que combustible, pour le chauffage, et dans une moindre mesure, pour produire de l'électricité et des biocarburants après transformation.

minoritaires dans notre pays.

Ces évolutions doivent permettre un abandon quasi total des énergies fossiles : les carburants fossiles pour le transport seront remplacés par l'électrification massive des véhicules légers et l'utilisation de biocarburants et de l'hydrogène pour les véhicules lourds. Quant au fioul domestique et au gaz naturel fossile utilisés pour le chauffage, ils laissent place à une augmentation du chauffage au bois et au biogaz obtenu à partir de la biomasse, ainsi que le développement des pompes à chaleur.

L'ampleur des changements à conduire

La prospective réalisée par RTE (Réseau de transport d'électricité), l'entreprise responsable du réseau public de transport d'électricité haute tension en France métropolitaine, illustre l'ampleur des changements à réaliser dans notre bouquet énergétique (voir figure du bas, p. 15).

La décarbonation de l'électricité et l'augmentation de 40 % de sa part dans le mix énergétique impliquent d'accélérer très fortement le développement des énergies solaire et éolienne, qui restent pour l'instant très minoritaires. Hors électricité, le recours à la biomasse devra lui aussi être massif, avec en particulier le défi de remplacer la totalité du gaz d'origine fossile, qui représente actuellement plus de 20 % de l'énergie finale consommée, par du biométhane issu de méthanisation ou d'autres procédés en cours de développement et qui vont passer à un stade industriel dans les prochaines années (pyrogazéification, gazéification hydrothermale).●

1. url.inrae.fr/3FvxNeE

2. Fit for 55, décembre 2020. url.inrae.fr/3QaNOGX

3. url.inrae.fr/3Fz5vjs

4. Loi LTECV, loi de transition énergétique pour la croissance verte, 2015

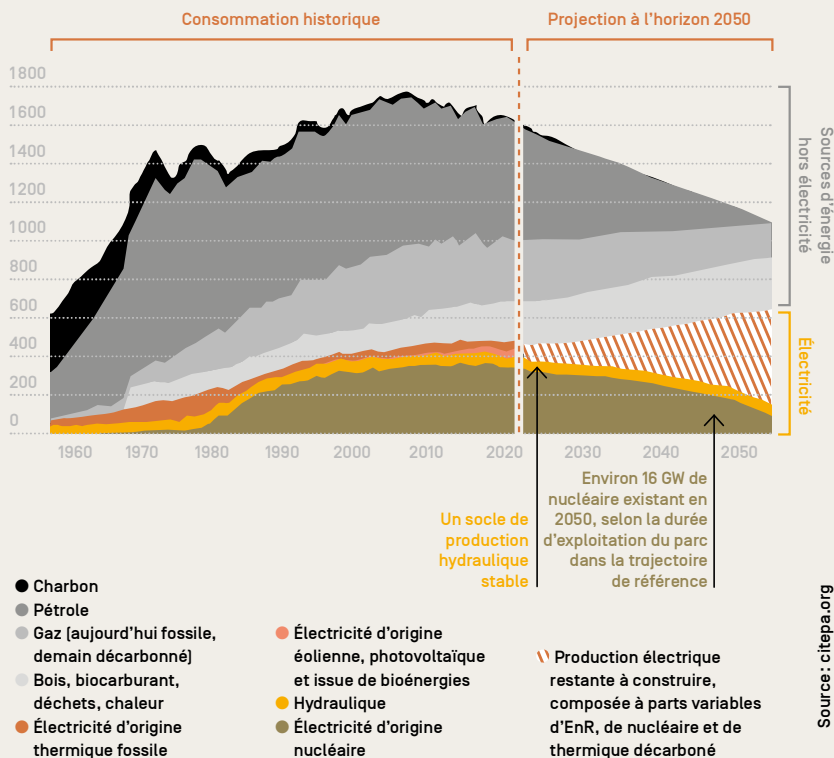
ÉLECTRICITÉ

Une énergie transformée

Contrairement au pétrole, au gaz ou au bois, l'électricité est produite à partir d'autres d'énergies : combustion du charbon, fission d'atomes d'uranium, force du vent ou de l'eau, etc. Toutes les voies de production d'électricité occasionnent des pertes plus ou moins importantes ; le rendement des centrales thermiques fossiles et des centrales nucléaires est d'environ 30 %, les deux-tiers de l'énergie étant perdus sous forme de chaleur. Pour produire 1 kWh d'électricité, il faut donc dépenser 3 kWh d'énergie primaire.

Une meilleure valorisation de cette chaleur perdue constitue ainsi un enjeu important. A contrario, la production d'électricité par les énergies renouvelables a un rendement de 100 % par rapport à l'énergie captée [voir p. 23] mais soulève une autre question, celle du stockage qui induit également des pertes : le rendement de conversion des batteries lithium-ion ou des station de transfert d'énergie par pompage [STEP] est de 70-80 %, celui du stockage sous forme d'hydrogène [H2] est de 30-40 %.

ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION TOTALE D'ÉLECTRICITÉ ET DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE FINALE POUR LES AUTRES ÉNERGIES EN FRANCE



Source : citepa.org

SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE

INRAE, la preuve par l'exemple

En tant qu'établissement public tenu à l'exemplarité énergétique⁴, INRAE met en place un plan d'action national pour économiser l'énergie dans ses bâtiments, plan décliné avec une équipe « énergie » dédiée dans chacun de ses 18 centres et dans son centre-siège. Trois centres pilotes (Pays de la Loire, Grand-Est Colmar et Nancy) ont par exemple mis au point une méthode pour suivre les consommations énergétiques au niveau de chaque bâtiment afin d'identifier les actions à mener. Parmi celles-ci, la sensibilisation des utilisateurs peut permettre 10 à 30 % d'économie. La sobriété numérique est aussi encouragée, en allongeant la durée de vie des matériels informatiques et en privilégiant l'achat d'équipements reconditionnés. Au niveau des transports, l'usage du vélo, du covoiturage et la réduction des trajets aériens sont encouragés. Au-delà de la sobriété énergétique, INRAE favorise les énergies renouvelables (véhicules de fonction électriques, arrêt des chaudières à fioul en 2029) et le recyclage des déchets : le centre Île-de-France-Versailles-Saclay s'emploie à recycler les plastiques de laboratoire avec une start-up locale. À travers toutes ces actions, INRAE s'inscrit dans un cadre plus large et participe à une initiative nationale de la recherche publique française pour évaluer et diminuer son empreinte carbone. Ainsi, 2 000 chercheurs et 20 laboratoires pilotes se sont engagés pour tester des solutions sous l'égide de l'Ademe, du CNRS et d'INRAE.

ÉNERGIES RENOUVELABLES, AUJOURD'HUI ET DEMAIN

CONSUMMATION D'ÉNERGIES RENOUVELABLES EN 2021, EN FRANCE



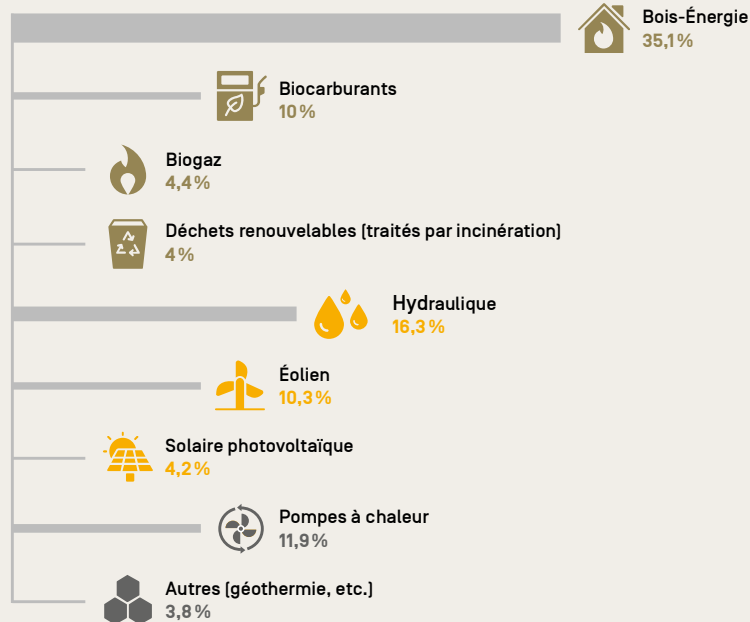
19,3 %

C'est la part des énergies renouvelables [EnR] dans la consommation finale brute



x2

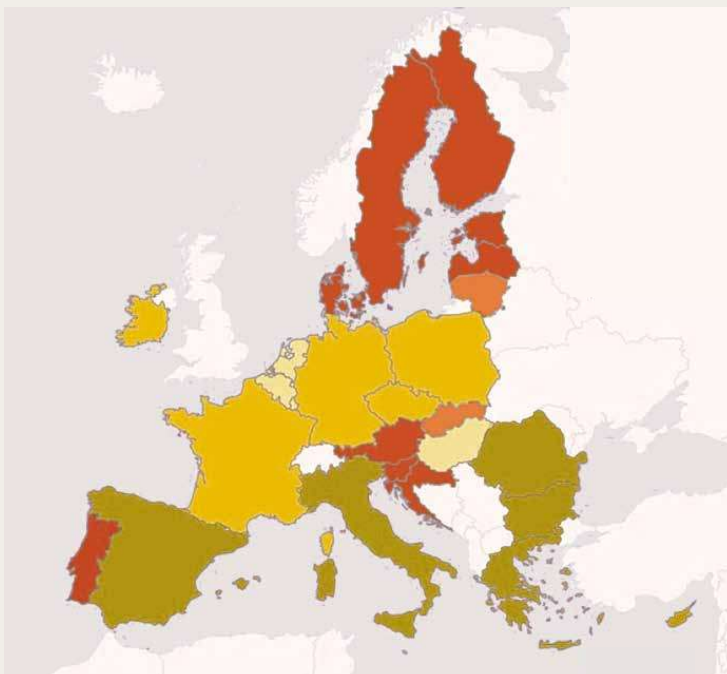
Évolution de la consommation primaire d'EnR, de 1990 à 2021, en France métropolitaine



- Énergies issues de biomasse
- Énergies majeures pour l'électricité
- Autres

Source : Calculs SDES

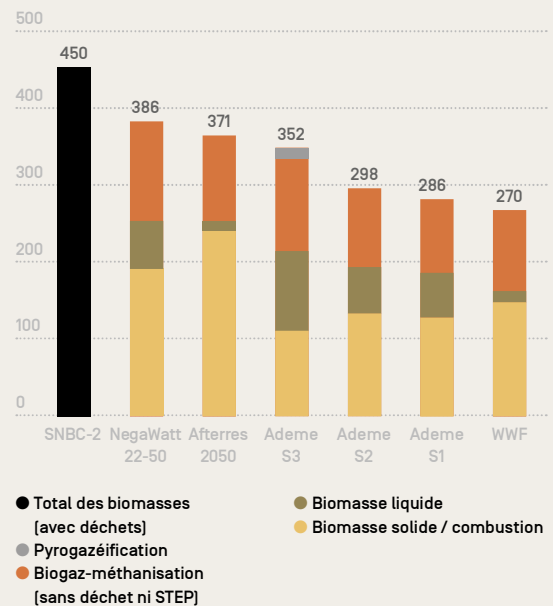
PART DES ÉNERGIES RENOUVELABLES DANS LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE EN 2020



Part, en %
 ● Plus de 30 ● Entre 25 et 30 ● Entre 20 et 25
 ● Entre 15 et 20 ● Moins de 15

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

OBJECTIF D'ÉNERGIE ISSUE DE LA BIOMASSE EN 2050 ET SCÉNARIOS DES DIFFÉRENTS ACTEURS



- Total des biomasses (avec déchets)
- Pyrogazéification
- Biogaz-méthanisation (sans déchet ni STEP)
- Biomasse liquide
- Biomasse solide / combustion

Pyrogazéification et méthanisation procédés d'obtention de biogaz.

Biomasse liquide essentiellement biocarburants.

Biomasse solide essentiellement bois-énergie.

Source : Rapport WWF, janvier 2022

ÉNERGIES RENOUVELABLES UNE TRANSITION À ACCÉLÉRER

Selon la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC), la part de la biomasse dans le bouquet énergétique français doit être multipliée par 2,5 à l'horizon 2050, par rapport à l'année 1990. L'analyse des ressources disponibles amène à questionner cet objectif et à considérer d'autres voies de production d'énergie en lien avec l'agriculture, en particulier l'agrivoltaïsme.

Solutions.

Selon la SNBC-2, pour atteindre la neutralité carbone en 2050, la quasi-totalité de l'énergie consommée en France devrait être décarbonée. Pour cela, la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) décrit les mesures à prendre et fixe des objectifs intermédiaires : 33% d'énergies renouvelables dans le bouquet énergétique français en 2030 et 40% d'électricité renouvelable produite. Selon cette trajectoire, la part d'énergies renouvelables aurait dû être de 23% en 2020. Or, elle n'était que de 19,3% en 2021, certes en augmentation par rapport à 2019 (17,2%), mais en deçà des objectifs. Il faut donc accélérer la transition énergétique en accroissant rapidement la production d'énergie renouvelable. Avec environ 19,3% d'énergies renouvelables dans son bouquet énergétique final en 2021, la France accuse un certain retard par rapport à la plupart des autres États membres de l'Union européenne et se classe au 17^e rang sur 27, loin derrière la Suède (61%), la Finlande (45%) et le Danemark (42%). Comment augmenter la part des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique français ? Quelles sont celles qui présentent le plus fort

potentiel et qui seraient à favoriser ? Le choix du bouquet énergétique de demain est une des questions majeures que cherche à résoudre la PPE. Ce choix stratégique doit prendre en compte des considérations d'ordre économique (coût des différentes sources d'énergie), technique (leur efficacité), environnementale (leur propre impact carbone, les conséquences en termes de biodiversité, d'impacts sur l'eau, l'air, les sols, etc.) et sociale (appropriation par les consommateurs des différentes mesures, actions en faveur des énergies renouvelables...). Mais au préalable, il faut s'interroger sur la disponibilité des ressources et leur répartition sur le territoire, en particulier pour les ressources en biomasse, qui fournissaient déjà en 2021 la moitié des énergies renouvelables.

La biomasse : limites et pistes de développement

La biomasse utilisée à des fins énergétiques provient essentiellement des cultures, des effluents d'élevage et de la forêt. Or, le recours à ces ressources est limité par la concurrence avec les →

usages alimentaires des cultures, le besoin de retour de carbone au sol, les émissions de GES liées à l'activité de production agricole (protoxyde d'azote) et la vulnérabilité face au changement climatique pour les forêts.

En tenant compte de ces tensions, le scénario de la SNBC-2, qui prévoit de multiplier par 2,5 la part d'énergie produite à partir de la biomasse (450 TWh) apparaît très volontariste par rapport à d'autres scénarios (Ademe, NegaWatt, Afterres, WWF) qui prévoient plutôt une production d'énergie issue de biomasse comprise entre 270 et 386 TWh en 2050.

La vulnérabilité de la forêt

Même si la surface de la forêt métropolitaine est en accroissement régulier depuis 1985, la ressource en bois est menacée par le changement climatique : les inventaires forestiers effectués depuis 2010 révèlent une moindre croissance des arbres et une mortalité accrue, liées aux sécheresses mais aussi aux épisodes de gel, aux ravageurs et aux incendies. Il s'ensuit non seulement une diminution possible des quantités de bois

OBJECTIFS DE BIOMASSE-ÉNERGIE POUR 2050

450 TWh
DONT :

250 TWh
issus de la
biomasse agricole

100 TWh
issus de la
biomasse forestière

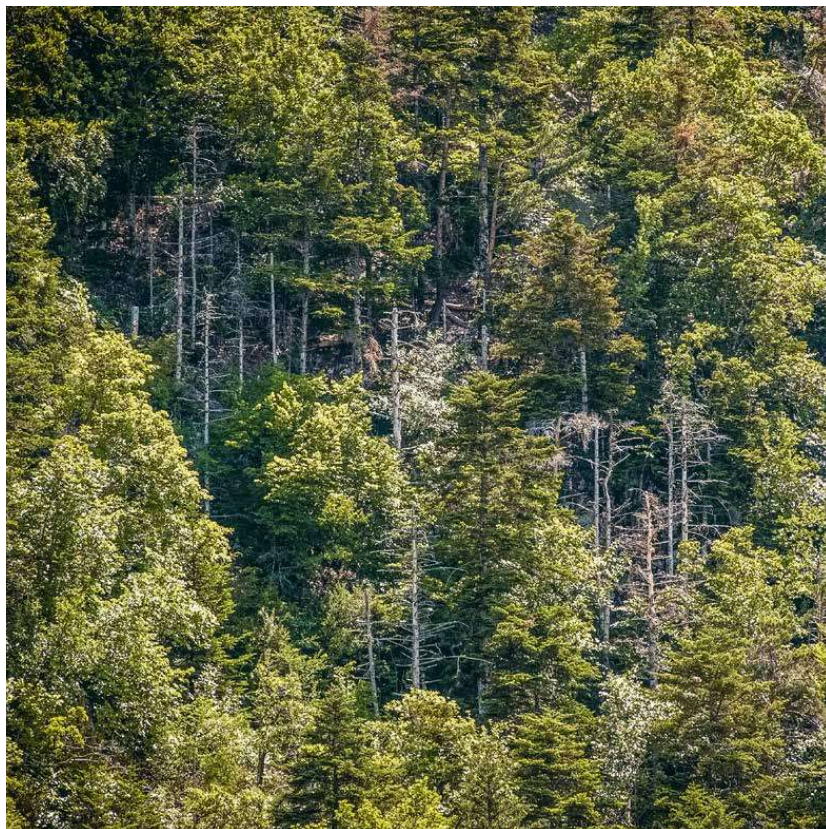
100 TWh
issus de déchets

source : prospective
CRE, 2023.



Dépérissement
en forêt du Mont
Ventoux.

© INRAE - Bertrand Nicolas



disponibles pour la production d'énergie décarbonée, mais aussi une forte réduction de la fonction de puits de carbone des forêts. Or, cette fonction de puits de carbone est primordiale pour atteindre l'objectif de neutralité carbone, en plus d'une baisse des émissions.

Préserver la forêt face au changement climatique implique des actions volontaristes de protection et de choix d'essences adaptées dans le cas de plantations (Ressources#2, avril 2022). Le renouvellement forestier fait l'objet d'une enveloppe de 150 millions d'euros dans le Plan France Relance annoncé fin 2020 par le gouvernement.

La préservation de la forêt passe aussi par une gestion durable des prélèvements, sans épuiser le sol et en permettant le renouvellement des arbres (voir p. 28).

La compétition avec les cultures alimentaires

La biomasse agricole, cultures et prairies, peut certes être utilisée pour générer de l'énergie (production de biocarburants et de biogaz par méthanisation) mais sa vocation première reste de nourrir les humains et les animaux. Pour éviter de concurrencer cet usage alimentaire, 2 pistes sont à privilégier : l'utilisation de résidus de culture (pailles de céréales, d'oléagineux ou de protéagineux, cannes de maïs, fanes de betteraves) et le développement de cultures intermédiaires qui s'intercalent entre les cultures alimentaires principales. Avec cependant des précautions : pour les résidus de culture, il faut arbitrer avec d'autres usages (litières et fourrages pour les animaux, retour au sol pour maintenir sa teneur en matière organique). Pour les cultures intermédiaires, il faut veiller à les optimiser sans concurrencer les cultures principales qui les précèdent et les suivent (voir p. 32).

La valorisation des résidus de culture et des cultures intermédiaires fournit donc de bonnes pistes pour éviter de concurrencer l'usage alimentaire des terres. En effet, l'utilisation actuelle de cultures alimentaires (blé, maïs, colza, betterave, etc.) pour produire des biocarburants de 1^{re} génération (bioéthanol, biogazole) ne peut être étendue de façon significative dans un contexte de tension internationale sur la sécurité alimentaire. Ces biocarburants devraient céder peu à peu la place à des biocarburants de 2^e génération, au fur et à mesure qu'ils gagneront en compéti-

Adapter les bouquets énergétiques à chaque territoire

Toutes les formes d'énergies, même renouvelables, ont leurs limites, économiques, environnementales ou encore sociétales. Il faut souvent arbitrer entre plusieurs usages et envisager des bouquets combinant plusieurs formes d'énergie et de ressources selon les territoires.

Entretiens croisés.

Lorie Hamelin

Titulaire de la chaire INRAE sur les transitions vers des économies à bas-carbone fossile

Lorie Hamelin mène un projet ambitieux visant à construire des scénarios régionaux d'utilisation de la biomasse à des fins énergétiques et non énergétiques.

L'objectif ultime est d'établir une base de données facile à consulter pour les décideurs : pour chaque type de biomasse, elle permettra de choisir le meilleur usage et le meilleur procédé, compte tenu des rendements, des impacts environnementaux et des usages substitués (c'est-à-dire ce qu'apporte cette biomasse si elle n'est pas utilisée pour produire de l'énergie). On verra ainsi apparaître des régions plus propices à certains usages de la biomasse qu'à d'autres. Le projet

nécessite une cartographie des ressources en biomasse et l'analyse fine de leur composition. Il procède ensuite par « brique d'usage » : plateforme gaz, plateforme biocarburants, etc. Pour chaque usage et chaque substrat, il compare les procédés en termes de rendement et d'impacts environnementaux, grâce à l'analyse de cycle de vie [ACV]. Cette ACV calcule 16 indicateurs environnementaux, dont l'impact sur l'occupation des terres et l'impact sur les ressources en eau. « Par la suite, nous ambitionnons d'ajouter un volet économique et un volet de symbiose urbaine, pour récupérer le maximum d'énergie : par exemple utiliser la chaleur, souvent perdue, émise par les procédés de méthanation ou les usines d'incinération, pour déterminer où produire des fruits et légumes en serre. Cela renvoie à une notion de « métabolisme des territoires », à l'instar du métabolisme d'un organisme dont les grandes fonctions [digestion, respiration, etc.] sont coordonnées. Toutes ces informations seront traduites sous forme de jeux de données opérationnels, conclut Lorie Hamelin, consciente de la taille et de l'enjeu du défi.

Ludovic Montastruc et son équipe

de l'ENSIACET

Ils étudient les multiples interactions entre les productions d'énergie, de nourriture et l'usage de l'eau. Dans un projet pilote en Aveyron, ils utilisent la plateforme de modélisation Maelia, développée par INRAE, pour identifier les meilleurs lieux d'implantation d'éoliennes ou de panneaux photovoltaïques, en termes de production et de vente d'électricité, ce qui dépend du climat et des subventions disponibles. Puis il en modélise les conséquences pour la production agricole et l'usage

de l'eau. « Dans cette démarche, on part des ressources naturelles et de ce qu'elles permettent de faire, puis on définit des scénarios d'aménagement du territoire. Cette approche systémique, novatrice dans le domaine du PSE (Process system engineering), part du principe que c'est la nature qui nous dicte ses limites », analyse Ludovic Montastruc.

Patrick Criqui

Économiste de l'énergie et conseiller auprès de France Stratégie, laboratoire d'économie appliquée de Grenoble, CNRS-UGA

Pour Patrick Criqui, la problématique de la mobilisation de la biomasse à des fins énergétiques amène à adopter une perspective multiéchelle. « C'est à l'échelle nationale ou territoriale qu'il convient de se placer pour construire des scénarios de répartition de la biomasse, afin de boucler les grands équilibres : offre/demande, utilisation des terres, arbitrage entre les usages de la biomasse. » L'évaluation de ces scénarios requiert ensuite une approche pluridisciplinaire et embrasse 3 dimensions : économique, environnementale et sociétale, qui interviennent chacune à différentes échelles. L'évaluation économique doit être systémique pour la définition des politiques publiques, même si elle peut se faire aussi à l'échelle microéconomique d'un projet. L'évaluation environnementale, qui mobilise notamment les méthodes de l'analyse de cycle de vie, peut être conduite à des échelles locales et/ou territoriales. Enfin, la dimension sociétale suscite souvent des processus de co-construction des solutions au niveau local.

tivité. Ces biocarburants sont issus de cultures non alimentaires : miscanthus, switchgrass, taillis à courtes rotations (saules, robiniers, peupliers) : ces cultures dédiées représentent 10 000 ha en 2020 (source ONRB). Il faudra cependant s'assurer que le déploiement de ces cultures non alimentaires, pérennes et à fort rendement de biomasse, ne concurrence pas indirectement l'alimentation en occupant des terres agricoles de qualité et réserver plutôt ces cultures pour valoriser des terres marginales ou pour protéger des zones de captage. Les recherches se poursuivent pour améliorer les rendements de production de ces biocarburants de 2^e génération, ainsi que de 3^e génération (à partir de microalgues ou autres microorganismes).

La valorisation des déchets carbonés non végétaux

Une autre source de biomasse pourrait jouer un rôle à l'avenir : les déchets carbonés non végétaux. La SNBC-2 prévoit que leur utilisation fournisse un quart de l'énergie issue de biomasse à l'horizon 2050 (100 TWh issus de déchets sur 450 TWh d'énergie totale issue de biomasse). Ces déchets sont d'origines très diverses : effluents d'élevage, biodéchets des ménages et de la restauration, résidus de l'industrie agroalimentaire, boues de station d'épuration... Ils sont actuellement peu valorisés : les effluents d'élevage (fumier, lisier) et les boues sont en majeure partie épandus sur les sols (même si dans certaines régions les effluents d'élevage sont de plus en plus mobilisés pour la méthanisation), tandis que les biodéchets non épandables sont enfouis ou brûlés et utilisés dans les cimenteries. Différents travaux de recherche visent à valoriser ces déchets. Ainsi, INRAE met au point des prototypes de microméthanisation pour produire du biogaz à partir de déchets ménagers (voir p. 32). D'autres procédés de production de biogaz permettant d'utiliser ces déchets sont également à l'étude, notamment la gazéification hydrothermale.

La valorisation des déchets carbonés non végétaux représente un réel potentiel énergétique et permet le recyclage de la matière dans un modèle vertueux d'économie circulaire. Son développement est cependant conditionné à son coût, à l'évolution technologique des procédés de transformation (en particulier la gestion des contami-

3% de la SAU

Les biocarburants de 1^{er} génération représentent actuellement environ 3% de la superficie agricole utilisée française (SAU), soit environ 1 million d'ha.

COÛTS DU MWH ÉLECTRIQUE PAR TYPE DE PROCÉDÉ

36-55 \$

Solaire photovoltaïque

38-55 \$

Éolien terrestre

100 \$

Gaz fossile

80-114 \$

Biomasse

150 \$

Nucléaire

250 \$

Charbon

Sources :
Compilation de plusieurs études :
IEA, 2021 [International Energy Agency],
Cour des comptes 2021,
Ademe 2021,
Buthada 2022

nants chimiques et des pathogènes dans les boues de station d'épuration et l'hygiénisation des déchets alimentaires de cuisine et de table) et à l'organisation des filières de collecte et de transport. Il faut aussi prendre en compte la perception sociétale des installations de transformation de la biomasse.

Le potentiel de l'agrivoltaïsme

L'agrivoltaïsme dans son principe vise à écarter le risque de concurrence entre énergie et alimentation car il associe sur une même surface la production d'énergie et la production agricole. Il présente aussi des atouts considérables en termes de coût et d'efficacité.

En effet, même en tenant compte des investissements, l'énergie photovoltaïque est actuellement l'une des moins coûteuses si l'on considère le coût de production en sortie de centrale, auquel il convient cependant d'ajouter les coûts de gestion de l'électricité : coût d'équilibrage entre la production et la consommation, coût de raccordement au réseau, etc.). De plus, son coût de production tend à baisser, alors que le coût du gaz fossile par exemple a été multiplié par 4 entre 2021 et 2022 du fait du conflit ukrainien.

Outre ses avantages économiques, le photovoltaïque offre un fort rendement énergétique. Si l'on équipait en panneaux photovoltaïques 1% de la SAU française (soit 260 000 ha sur les 26,9 millions d'ha totaux), on pourrait produire autant d'énergie que le parc nucléaire actuellement en service en France (environ 300 TWh par an). La même surface (260 000 ha) de betterave convertie en biocarburants produirait seulement 13,5 TWh par an. L'énergie photovoltaïque est beaucoup plus efficace que les biocarburants pour la motorisation des véhicules : avec les biocarburants issus d'1 ha de cultures, une voiture peut effectuer un trajet de ≈ 22 000 km, alors que le même hectare équipé en panneaux photovoltaïques permet de faire un trajet de 3 millions de km avec un véhicule électrique !

L'agrivoltaïsme représente donc un potentiel considérable qui reste à exploiter. ●

L'AGRIVOLTAÏSME

LA VOIE DE L'AVENIR ?

L'agrivoltaïsme, qui combine production agricole et production d'énergie sur les mêmes terres, contribue à éviter la concurrence avec l'usage alimentaire des sols. Une technologie pensée et évaluée en prenant en compte toutes ses dimensions, agronomiques, économiques, sociales et environnementales.

État des lieux.

Pour décarboner la production d'électricité, la SNBC mise sur un développement accéléré de l'énergie solaire, en particulier photovoltaïque. Elle encourage les installations solaires individuelles, avec une projection en 2050 de 8 millions de maisons équipées en panneaux solaires, soit 1 maison sur 2. Il faut cependant disposer de toits bien exposés et le coût d'installation est élevé. L'installation de panneaux au sol est moins onéreuse, mais pose la question de l'utilisation des terres, en concurrence potentielle avec la production agricole.

Une combinaison gagnant-gagnant

L'agrivoltaïsme apporte de nouvelles réponses puisque les panneaux solaires sont installés sur des surfaces agricoles déjà cultivées. La présence de panneaux ne doit pas pénaliser la production agricole. Bien pensé, l'agrivoltaïsme se révèle au contraire très bénéfique. Installés sur une parcelle agricole, les panneaux photovoltaïques permettent de protéger les plantes ou les animaux d'élevage contre la grêle, le gel, la chaleur ou la sécheresse. Une étude allemande a montré qu'en conditions sèches et chaudes de l'année 2018, la productivité

AGRIVOLTAÏSME EN FRANCE

≈ 1000

installations en autoconsommation, depuis les débuts en 2020

≈ 500 ha

en champs en 2021

300 ha

sur serres

source : Unite

de 4 cultures (pomme de terre, céleri-rave, trèfle et blé d'hiver) a presque doublé en présence de panneaux solaires¹. INRAE, pionnier dans l'agrivoltaïsme, accompagne de nombreux projets de recherche en partenariat avec diverses entreprises spécialistes du photovoltaïque. L'objectif est toujours de s'assurer que les projets répondent avant tout à une problématique agricole pour avoir une véritable synergie entre production alimentaire et production d'énergie.

Les serres photovoltaïques

L'agrivoltaïsme a commencé avec des serres équipées dans les années 2000. Les serres protègent les cultures contre les aléas climatiques et les bioagresseurs. L'ajout de panneaux solaires fournit en plus de l'électricité dont la vente permet de financer ces installations coûteuses. « À INRAE, nous étudions ces dispositifs sur le plan économique, social et environnemental sur une dizaine de sites. En production de mâche, fraises et tomates, le modèle économique est intéressant et dégage une marge de plus de 10% par an pour les producteurs », rapporte Christine Poncet, chercheuse au centre INRAE Provence-Alpes-Côte d'Azur. Dans les régions du →



© INRAE - Christian Dupraz

Sud, l'ombre produite par les panneaux apporte une protection contre les excès de chaleur, mais dans les pays du Nord, cette ombre peut parfois affecter le rendement. Des recherches visent à définir les taux d'ombrages maximaux acceptables, afin de remettre en culture un nombre non négligeable de serres photovoltaïques qui sont actuellement inutilisées à cause de rendements trop faibles.

L'agrivoltaïsme en élevage

Plusieurs études innovantes sont menées à INRAE sur des systèmes associant des panneaux

Les panneaux apportent de l'ombre aux animaux et protègent les prairies contre les sécheresses.

↑
 Prototype agrivoltaïque de Lavalette (INRAE et Sun'R, Montpellier) : culture de salades sous le dispositif de panneaux fixes (2011).

solaires à des prairies pâturées par des ovins ou des bovins. Pour Catherine Picon-Cochard, chercheuse spécialiste de la prairie au centre INRAE Clermont-Auvergne-Rhône-Alpes, il s'agit d'un enjeu fort car les panneaux apportent de l'ombre aux animaux et peuvent contribuer à protéger les prairies contre les sécheresses extrêmes de plus en plus fréquentes. C'est le cas sur 2 sites où des éleveurs d'ovins ont implanté des panneaux inclinés au sol² : l'herbe pousse bien sous les panneaux, elle sèche moins et ne gèle pas, sa production annuelle finale est la même que sans panneaux sur ces sites à faible production fourragère. Sur des prairies plus productives, pour lesquelles la lumière est le facteur limitant, une réduction de production fourragère en présence des panneaux pourrait apparaître. Autre résultat : la composition en espèces végétales varie, avec un taux d'azote et de fibres plus élevé sous les panneaux, ce qui favorise la digestibilité de l'herbe. Un modèle de panneaux verticaux est étudié avec des bovins dans une expérimentation INRAE à Laqueuille près de Clermont-Ferrand. « On attend dans ce cas des résultats plus nuancés qu'avec les panneaux inclinés qui apportent un effet parasol plus fort,

mais aussi une ombre permanente qui peut freiner la photosynthèse. » Avec ce dispositif³, les chercheurs quantifieront l'impact des panneaux sur les grandes fonctionnalités de la prairie: production et qualité de la biomasse, biodiversité et stockage de carbone dans le sol. Des observations et des capteurs (caméras et podomètres) permettront également d'analyser les comportements des bovins: choix alimentaires, repos dans les rangs des panneaux, frottement aux panneaux... Les chercheurs évalueront enfin l'impact sur la prairie du chantier d'installation des panneaux (tassement du sol, dégradation de la végétation). « L'installation de panneaux n'est pas anodine et peut faire l'objet de débats, conclut Catherine Picon-Cochard. D'où l'importance d'apporter des résultats tangibles sur leurs avantages et leurs inconvénients et d'associer toutes les parties prenantes dans les discussions. »

Un pôle national de recherche, d'innovation et d'enseignement sur l'agrivoltaïsme

En 2023, INRAE a mis en place et coordonne le Pôle national de recherche, d'innovation et d'enseignement sur l'agrivoltaïsme, basé sur son centre Nouvelle-Aquitaine-Poitiers à Lusignan. Il s'agit d'un consortium qui rassemble aujourd'hui plus d'une trentaine d'unités de la recherche publique, ainsi que des entreprises des secteurs énergétique et agricole (voir carte ci-contre). Ce pôle national vise à fédérer les travaux conduits en France autour de la production agricole et électrique. Il doit permettre le développement raisonné de la technologie photovoltaïque sur les terres agricoles, en cohérence avec la loi votée au Sénat en février 2023 encadrant l'agrivoltaïsme. Il a aussi vocation à contribuer à la formation et à l'appui aux politiques publiques⁴. ●

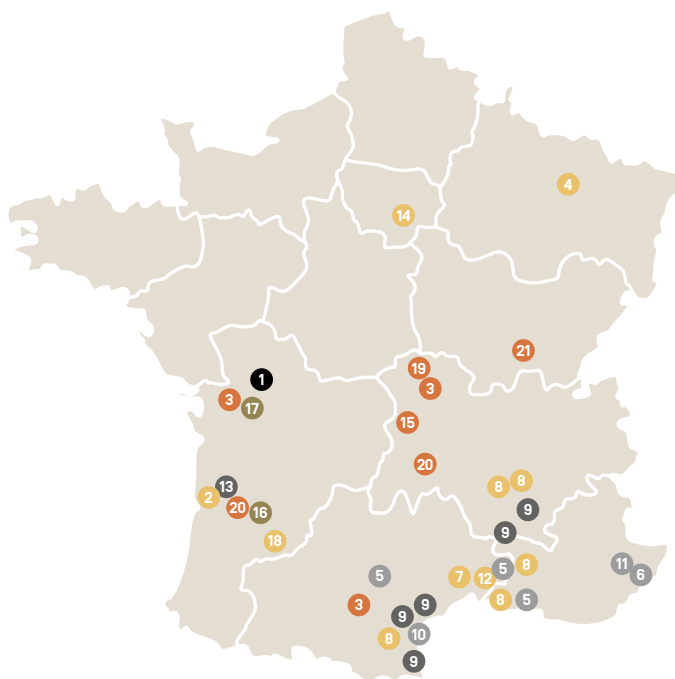
1. Trommsdorff M. et al. (2021). bit.ly/3GxoQ4Q

2. En moyenne-montagne dans le Cantal et en plaine dans l'Allier, 2020-2023.

3. Lire l'article: url.inrae.fr/3rJPC2u

4. Lire l'article: url.inrae.fr/3Z5YAXa.

SITES AGRIVOLTAÏQUES ÉTUDIÉS PAR INRAE EN 2023 DANS LE CADRE DU PÔLE NATIONAL



1
Pôle national de recherche, innovation, enseignement sur l'agrivoltaïsme

2 4 7 8
12 14 18
Cultures



3 15 19
20 21
Élevages ovins et bovins



16 17
Élevages avicoles



5 6 10 11
Culture sous serres



9 13
Viticultures



Avec : Valéco, BayWa r.e., EDF-Renouvelables, Valorem, Technique Solaire, Sun'Agri, UrbaSolar, TSE, JP Energie Environnement, Statkraft, CVE, Photosol, Solar Cloth, Sunpartner et Engie Green.



« Des panneaux ? Oui mais pas trop ! »

Entretien avec Christian Dupraz,
pionnier de l'agrivoltaïsme en France

Christian Dupraz, chercheur dans l'agrivoltaïsme au centre INRAE de Montpellier, évoque les conditions de la synergie entre la production d'énergie et la production agricole, les risques de dérive et les modèles économiques à privilégier.

Comment fonctionne la synergie agriculture-photovoltaïsme ?

Les panneaux solaires implantés sur les cultures sont devenus très perfectionnés : ils peuvent être mobiles et orientables selon des algorithmes de pilotage qui permettent de donner de la lumière aux plantes quand elles en ont besoin. Ainsi, ils peuvent être orientés horizontalement au-dessus des cultures, les protégeant contre la chaleur le jour, mais aussi contre le gel la nuit. Ils peuvent également être orientés verticalement pour laisser la pluie arroser la culture. La structure porteuse peut soutenir

des filets anti-grêle ou anti-insectes, ou servir de support pour installer des systèmes d'irrigation ou des palissades pour les arbres fruitiers. Les économies d'irrigation peuvent aller jusqu'à 30%. En outre, les installations sont réversibles, les structures sont ancrées par des pieux métalliques enfoncés dans le sol et facilement extractibles en fin de projet. Les analyses de cycle de vie réalisées dans le monde sont favorables, l'empreinte carbone liée à la fabrication des structures étant compensée par la production d'électricité décarbonée au bout de 3 à 5 ans environ, alors que la durée de vie des installations est de 25 à 40 ans. Cette synergie agriculture-photovoltaïsme dépend cependant d'un équilibre lié à la densité des panneaux qui ne doivent pas faire trop d'ombre.

Quelles sont les conditions de la synergie ?

Trop de panneaux pénalisent la culture en apportant trop d'ombre. Il faut dans l'idéal ne pas dépasser 20% de couverture du sol (2 000 m² de panneaux par hectare) si on veut

maintenir un rendement agricole normal¹. Or, les considérations économiques poussent les opérateurs à installer plus de panneaux. Il y a une forte asymétrie entre les bénéfices très élevés de la production électrique et ceux de la production agricole². Le coût de l'installation, très élevé, est en général pris en charge par l'opérateur d'électricité, qui en recueille aussi les bénéfices. L'agriculteur est rémunéré par les avantages agronomiques induits par la structure, en termes d'augmentation de la production (protection contre les aléas climatiques, économies opérationnelles, etc.). Mais il reçoit aussi le plus souvent un loyer élevé qui peut le dissuader de continuer à cultiver, d'où un risque d'arrêt des productions agricoles sur ces parcelles. Il faut donc bloquer la spéculation foncière en limitant les loyers versés par les opérateurs électriciens. Il serait préférable que l'agriculteur et les habitants voisins consommateurs d'électricité puissent participer, même à un faible niveau, à l'investissement dans la structure photovoltaïque et ainsi percevoir une



partie proportionnelle des revenus électriques. Plusieurs initiatives tentent d'encadrer l'agrivoltaïsme en France afin d'éviter les dérives : l'association France Agrivoltaïsme, un label AFNOR « Agrivoltaïsme positif » et des règles déontologiques émises par l'Ademe. Les décrets d'application de la loi sur l'accélération du développement des énergies renouvelables seront également essentiels pour encadrer cette pratique.

Quel est l'état actuel et le potentiel de l'agrivoltaïsme en France ?

La France est pionnière en agrivoltaïsme. INRAE a construit le premier prototype expérimental agrivoltaïque mondial en 2010 à Montpellier, en collaboration avec la société Sun'R, devenue Sun'Agri depuis. Nous avons créé le terme « agrivoltaïsme », dans un article scientifique publié en 2011³. Depuis, les recherches se poursuivent et les projets se diversifient sur tout le territoire : maraîchage en serres en Occitanie et PACA, vigne et arboriculture fruitière à Montpellier,

Avignon et Bordeaux, grandes cultures sur tout le territoire, élevage vers Clermont-Ferrand. Le potentiel est énorme. À mon sens, un objectif de 100 000 ha de systèmes agrivoltaïques est réaliste, et produirait environ 50 GW. Il faut réfléchir à la taille des projets, mais il s'agit d'une décision politique. Soit on favorise de grands projets (100 à 1000 ha) et peu d'agriculteurs en bénéficieront, soit on favorise de petits projets (1 à 5 ha), et beaucoup d'agriculteurs en profiteront. Pour l'instant, les électriciens tentent de sécuriser des surfaces agricoles pour leurs projets, et les agriculteurs sont sollicités de toutes parts. C'est un peu le far-west... Il est temps que la loi et ses décrets d'application viennent préciser les règles du jeu et calmer les esprits.

Comment avez-vous eu l'idée de l'agrivoltaïsme ?

En imitant l'agroforesterie ! Et en constatant l'inefficacité structurelle des biocarburants. Il est absurde de brûler des aliments dans nos moteurs. J'ai donc tenté de remplacer les arbres par des panneaux solaires. Cela

n'enlève rien aux vertus de l'agroforesterie qui a bien d'autres atouts mais cela a permis d'élaborer le concept d'agrivoltaïsme. D'autres équipes ont effectué ce raisonnement ailleurs dans le monde, notamment au Japon, mais nous avons été les premiers à mettre en place un dispositif de recherche sur ce sujet. Nous avons même appris plus tard que cette idée avait déjà été formulée il y a plus de 40 ans par un ingénieur allemand, mais sans aucun essai pour en tester la faisabilité. En 2010, la situation était mûre pour explorer cette option.

1. Dupraz C. (2023). bit.ly/3Nb0h1n

et par an, selon les systèmes de production.

2. Prix de l'installation : entre 500 000 et 1 million d'euros par ha, pour une marge électrique de 50 000 à 200 000 euros par ha et par an, alors que la marge de la production agricole est de l'ordre de 500 à 10 000 euros par ha

3. Dupraz C. et al. (2011). bit.ly/3RptLva

LE BOIS-ÉNERGIE

UN PILIER DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Pour remplacer les combustibles fossiles, la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) prévoit de doubler la chaleur issue de biomasse entre 2016 et 2028. L'enjeu consiste à atteindre cet objectif tout en préservant l'équilibre de la forêt et ses services écosystémiques. **Explications.**

Actuellement, les forêts françaises sont majoritairement gérées de façon durable : la récolte de bois est inférieure à l'accroissement naturel de la forêt, ce qui favorise sa fonction de puits de carbone. En effet, une forêt dont la gestion garantit le renouvellement capte plus de carbone qu'une forêt non exploitée. Cependant, le changement climatique affecte la santé de la forêt et menace son potentiel de captation de carbone et les ressources en bois. D'autre part, un constat inquiétant indique que la biodiversité de la forêt décroît depuis plusieurs années, et ce en France comme à l'échelle mondiale¹.

L'interconnexion entre les filières du bois

La filière bois d'œuvre prélève les troncs pour la charpente, la menuiserie et l'ameublement. Les filières bois-énergie et bois-industrie sont des sous-filières de la filière bois d'œuvre. En effet, elles en utilisent toutes deux des sous-produits et sont donc potentiellement en concurrence. Du fait de ces interconnexions entre filières, développer la filière bois-énergie implique de développer la filière bois d'œuvre, la seule qui soit en elle-même rentable économiquement pour les

→
Site de recherche
et d'expérimentation
de Montoldre
(03). Unité TSCF
Technologies
et systèmes
d'information pour
les agrosystèmes.

© INRAE -
Christophe Maître

syviculteurs. De plus, soutenir la filière bois d'œuvre présente un autre avantage en termes de bilan carbone : les constructions en bois permettent, d'une part de garder le carbone stocké dans le bois (effet de stockage), et d'autre part d'éviter de recourir à des matériaux à forte empreinte carbone comme le béton (effet de substitution). Actuellement, la filière bois d'œuvre est fragmentée, avec un manque d'articulation entre l'amont et l'aval et une difficulté des scieries françaises à traiter les troncs de fort diamètre. De ce fait, de grandes quantités de bois brut pour la construction sont exportées, tandis que les produits finis sont importés, ce qui se traduit par une balance commerciale déficitaire. Une meilleure organisation de la filière du bois d'œuvre est donc à encourager. Elle semble difficile à obtenir à court terme, mais pourrait concerner des volumes importants².

Hiérarchiser les usages du bois

Si l'on se place dans la perspective du changement climatique, il faut privilégier le stockage du carbone sur le long terme, ce qui amène à établir une hiérarchisation des usages du bois : favoriser →



le bois d'œuvre et, pour la filière bois-industrie, privilégier les produits à usage long tels que les panneaux et les isolants, plutôt que le papier et le carton. Avec pour conséquence bénéfique une augmentation en cascade des sous-produits qui peuvent être utilisés pour le bois-énergie. Il faut aussi préserver ce « capital bois » en gérant durablement les prélèvements, en renouvelant la forêt avec une diversité d'essences adaptées au changement climatique et en assurant une protection contre les incendies. Le coût de cet accompagnement actif est estimé à environ 200 millions d'euros/an⁵. En termes de gestion, la principale difficulté tient au morcellement de la forêt française, dont 75 % appartiennent à plus de 3 millions de propriétaires privés, ce qui rend difficile une exploitation concertée. Les CRPF (centres régionaux de propriété forestière) incitent à la création de groupements forestiers familiaux, lors de successions, et d'associations syndicales de propriétaires ayant une vision commune de la gestion forestière. ●

1. Lire l'article : url.inrae.fr/2wqhmAf
 2. Source : rapport I4CE, 2022 url.inrae.fr/3Qw9fs9
 3. Source : Cour des comptes, 2020

↓
 Plaquettes de bois utilisées comme source d'énergie dans les fours à déshydratation de la luzerne.

© Thiebeau Pascal.
 Hauts-de-France, 2009.



CHIFFRES CLÉS

La filière bois



FORÊTS
31 %

de la surface de la France, augmentation moyenne de la surface entre 1985 et 2020
 ≈ 85 000 ha/an
 ([l'équivalent de 3 forêts de Fontainebleau])



BOIS-ÉNERGIE
 ≈ **36 %**

de l'énergie renouvelable totale
 66 %
 de la chaleur renouvelable
 2,5 %
 de l'électricité renouvelable



PROPRIÉTAIRES DE FORÊTS
75 %

de la surface est privée
 3,3 millions de propriétaires, dont seuls
 1 % possèdent plus de 25 ha de forêt et sont tenus d'établir un document de gestion durable



EMPLOI
52 000

emplois directs et indirects



OBJECTIFS DE LA PPE EN 2028
x 2

doubler la chaleur issue de biomasse (bois-énergie et biogaz)
 10 millions de foyers chauffés au bois (25 % des foyers)

VOLUME UTILISÉ PAR LES DIFFÉRENTES FILIÈRES BOIS EN 2021

19,4 Mm³

Bois d'œuvre
 [planches, poutres, etc.]

10,5 Mm³

Bois-industrie
 [panneaux, cartons, etc.]

8,1 Mm³

Bois-énergie
 [bûches, granulés, plaquettes]
 + 21,5 Mm³ de bois prélevés directement dans les forêts par des particuliers.



8 Mm³/an

Augmentation potentielle du bois d'œuvre en valorisant mieux les feuillus et les ressources de faibles diamètre et qualité

[source : rapport I4CE, 2022]

5 Mm³/an

Augmentation potentielle du bois-énergie

Source: Ademe
url.inrae.fr/46Qd3dB



Un guide de bonnes pratiques pour prélever le bois

Entretien avec Nathalie Korboulevsky,
chercheuse au centre INRAE Val de Loire

L'augmentation de l'utilisation du bois-énergie soulève des préoccupations. L'extraction d'arbres entiers appauvrit les sols, nuisant à la biodiversité et à la circulation d'eau et d'oxygène. Les bois morts sont essentiels à la biodiversité forestière. Explications.

Quelle problématique entoure l'augmentation du recours au bois-énergie ?

Avec le développement de centrales à biomasse à l'échelle des agglomérations, alimentées par des plaquettes, sont apparues depuis 10-15 ans des pratiques qui consistent à couper des arbres entiers et à tout prélever¹. Ce qui serait acceptable pour renouveler une forêt malade pose problème pour la fertilité des sols et la biodiversité sur certains sites. C'est ce que nous avons montré : avec de telles pratiques, la quantité de nutriments diminue dans le sol, et son tassement par les engins est néfaste pour la circulation d'eau et d'oxygène. Enfin, cela fait longtemps que l'on sait que le bois mort est un support important de la biodiversité des forêts : 25 % des espèces sont inféodées au bois mort (pics, chauve-souris, insectes, champignons, mousses). Il faut donc laisser du bois

mort en place ! L'exploitation du bois-énergie par coupe d'arbres entiers est possible, à condition de respecter certaines règles. Un consortium, incluant des chercheurs et des gestionnaires, des représentants des professionnels forestiers et des filières bois, du monde académique ainsi que des associations environnementales, a élaboré en 2018 un guide de bonnes pratiques à l'usage des exploitants de bois, publié par l'Ademe, avec des applications sur smartphone ou tablette². Il faut assurer maintenant leur transfert et leur appropriation par les professionnels impliqués dans la récolte de bois pour la production de plaquettes forestières.

Que préconisez-vous ?

La première chose à faire est d'établir un diagnostic de la sensibilité du site : les sols sableux, comme dans les Landes ou une partie de la Région Centre, sont plus sensibles aux prélèvements. Dans ces sols très pauvres, la coupe d'arbres entiers est déconseillée. Dans les sols moyennement sensibles, il faudrait laisser 30 % de menus bois et des gros billons. Dans les sols peu sensibles, en laisser 10 % en plus des gros billons peut suffire. Dans tous les cas, il faut laisser les feuilles au sol : elles sont jusqu'à 7 fois plus riches en nutriments que le bois des troncs et grosses branches, et 2 à 3 fois plus que les brindilles. Il faut donc couper les arbres de préférence

en hiver, une fois les feuilles tombées, ou bien, si l'humidité des sols ne le permet pas, laisser les branches au moins 6 mois en place pour que les feuilles se détachent. Pour compenser la perte de nutriments, des collègues d'INRAE étudient la possibilité de restituer au sol les cendres issues de la combustion du bois dans les centrales thermiques. Toutefois, cet apport ne peut pas compenser la perte de matière organique, qui joue pourtant un rôle crucial dans les processus physiques, chimiques et biologiques des sols.

« Le bois mort est un support important de la biodiversité des forêts : 25 % des espèces lui sont inféodées. »

1. Voir Ressources #2 : url.inrae.fr/46zRygn
2. Recommandations pour une récolte durable de biomasse forestière pour l'énergie - Focus sur les menus bois et les souches. Ademe. 2018, pp.51.

LA MÉTHANISATION, POUR UN GAZ NON FOSSILE

La méthanisation est la voie la plus mature pour obtenir du biogaz et du biométhane et remplacer progressivement le gaz naturel fossile. D'autres voies sont en cours de développement. **État des lieux.**



Déchets agricoles pour alimenter les méthaniseurs d'Agrivator énergie à Ribeaupville (68). © INRAE – Christophe Maître

Un des objectifs de la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) est de remplacer progressivement le gaz naturel fossile par une molécule identique, mais d'origine renouvelable et décarbonée: le biométhane. Celui-ci est produit par purification du biogaz, lui-même obtenu par divers procédés dont le plus mature est actuellement la méthanisation.

Une énergie au bilan carbone globalement neutre

La méthanisation consiste à dégrader la biomasse par les microorganismes qui se développent naturellement dans des fermenteurs en absence d'oxygène et à une température comprise entre 35 et 60 °C selon les procédés. On obtient du biogaz et un résidu appelé digestat. Le biogaz contient environ 55 à 70% de méthane, le reste étant principalement du CO₂ auquel s'ajoutent diverses impuretés (H₂S notamment). Le biogaz peut être utilisé directement pour produire de la chaleur et de l'électricité en cogénération, ou purifié en biométhane qui peut être injecté dans le réseau de gaz naturel ou utilisé comme biocarburant (bioGNV). Bien que dégageant du CO₂, la méthanisation présente un bilan carbone globalement neutre, contrairement au gaz fossile. En effet, le CO₂ émis par la méthanisation est celui qui a été capté par la biomasse végétale dans un cycle de temps court.

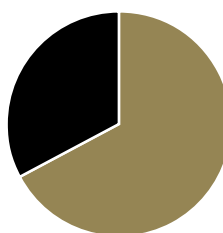
Une étude menée par INRAE Transfert à la demande de GRDF a montré qu'un scénario de méthanisation agricole réduit de 73% l'impact sur le changement climatique et de 65% l'impact sur l'épuisement des ressources énergétiques, par rapport à un scénario sans méthanisation, et ce dans 2 systèmes agricoles modélisés: la polyculture (méthanisation des résidus de culture et des cultures intermédiaires à vocation énergétique - CIVE) et l'élevage (méthanisation des effluents). L'étude a mobilisé la méthodologie de l'analyse de cycle de vie (ACV) et a évalué 16 indicateurs environnementaux en analysant les 3 fonctions associées à la méthanisation agricole: la production d'énergie, la gestion des effluents et la fertilisation des sols¹.

Une matière première essentiellement agricole

Les principales sources de biomasse utilisées actuellement en France pour la méthanisation sont d'origine agricole: les effluents d'élevage et →

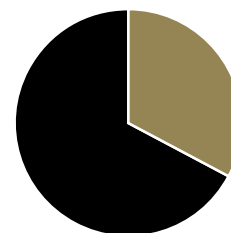
CHIFFRES CLÉS 2021

La méthanisation



2/3

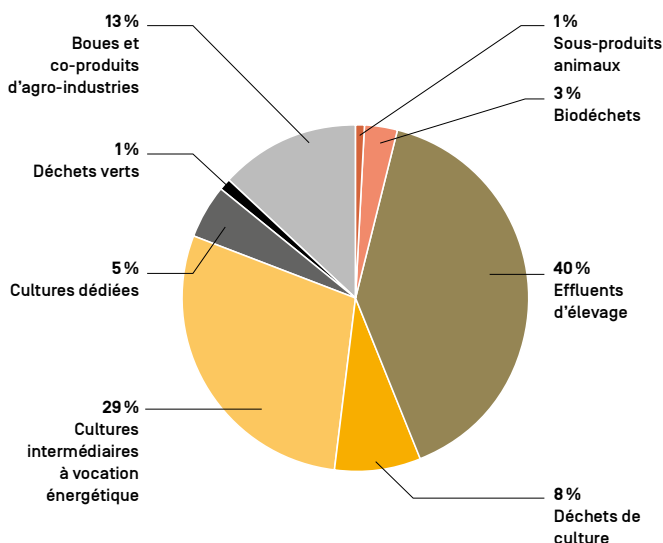
du biogaz est consommé sur place pour produire de la chaleur et de l'électricité



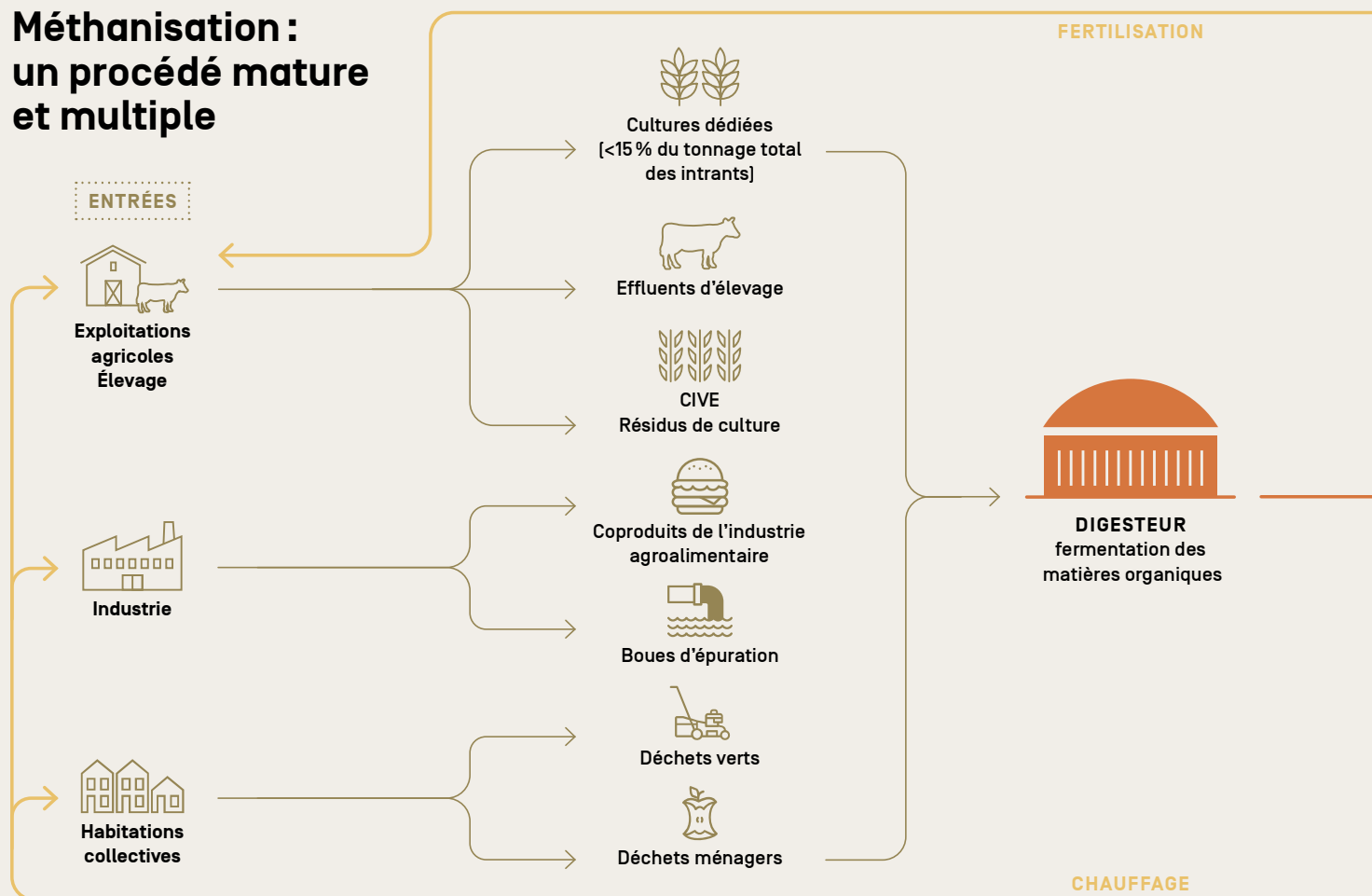
≈ 1/3

des méthaniseurs injectent le biométhane directement dans le réseau de gaz, encouragés par la politique de rachat du gaz produit

RÉPARTITION DU GISEMENT VALORISÉ EN MÉTHANISATION AGRICOLE EN 2020 EN FRANCE [tonnes]



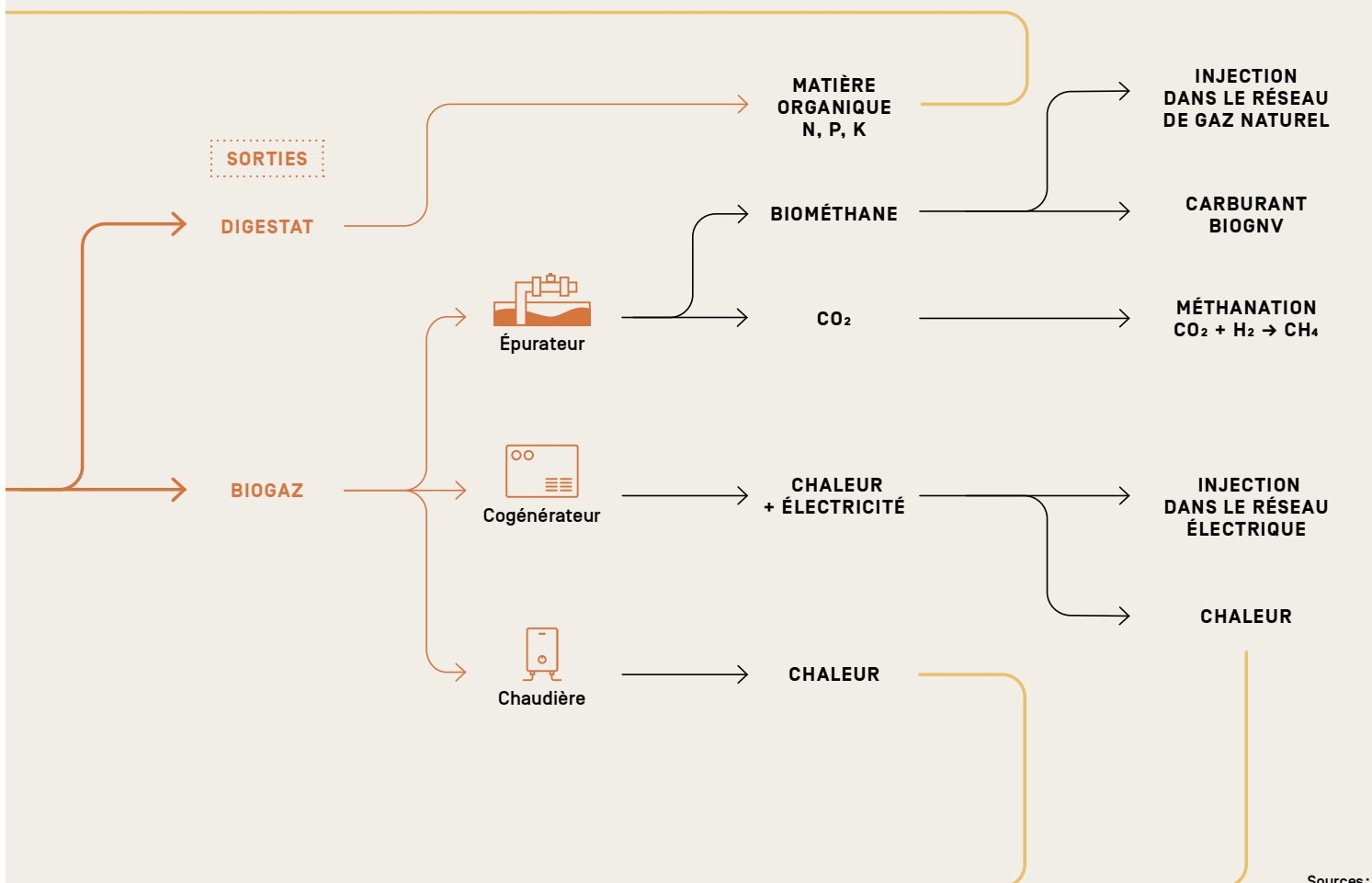
Méthanisation : un procédé mature et multiple



les CIVE. Le potentiel pour développer plus avant la méthanisation agricole réside principalement dans une meilleure valorisation des CIVE et des résidus de cultures (paille de céréales, d'oléagineux ou de protéagineux, tiges de maïs, fanes de betterave), deux sources de biomasse qui n'entrent pas en concurrence avec l'usage alimentaire des terres. Les CIVE sont des cultures intermédiaires intercalées entre des cultures alimentaires principales, avec lesquelles elles n'entrent pas en compétition à condition d'être bien gérées. Il faut en particulier éviter d'allonger leur durée de culture, ce qui conduirait à avancer la récolte de la culture principale qui précède et/ou à retarder l'implantation de la culture principale qui suit. Il faut aussi veiller à ce que la consommation d'eau des CIVE n'affecte pas la culture suivante². Les CIVE n'occupent pas de terres supplémentaires. Elles se distinguent en cela des cultures énergétiques dédiées, qui sont implantées exclusivement pour la production d'énergie et qui peuvent entrer en compétition avec les cultures alimentaires en termes d'occupation des sols³. Les CIVE se développent rapidement en France car elles présentent de multiples avantages. En gardant le sol

couvert, elles le protègent contre l'érosion, améliorent sa structure et sa capacité à retenir de l'eau, limitent le développement des adventices. Les CIVE représentent un potentiel important encore sous-valorisé. À noter toutefois que d'un point de vue économique, il n'est pas rentable de récolter une CIVE dont la production est inférieure à 5 tonnes de matière sèche par hectare. Cependant, la tentation d'augmenter les rendements des CIVE ne doit pas conduire à des comportements non-vertueux comme l'irrigation, la fertilisation azotée ou l'usage des produits phytosanitaires. Il paraît préférable de se limiter aux CIVE d'hiver dans certaines régions. Les résidus agricoles représentent aussi une source de biomasse non concurrentielle avec l'alimentation. La paille est la principale ressource résiduelle en France, mais elle est encore peu exploitée à des fins énergétiques.

Le digestat, un atout pour la fertilité des sols
Lorsqu'elle est laissée au sol, la biomasse agricole résiduelle (résidus de cultures et effluents d'élevage) constitue une source de matière organique et de nutriments (N, P, K = azote, phosphore, po-



tassium) pour maintenir la fertilité des sols. Prélever cette biomasse pour alimenter un méthaniseur pourrait donc générer des pertes de fertilité. Le retour au sol des digestats de méthanisation permet en partie de résoudre cette question, car les digestats conservent une bonne part des matières fertilisantes de départ.

Pour bien gérer les digestats, il est nécessaire de caractériser finement leur composition et leurs propriétés, et de comparer leurs effets sur le sol à ceux de la biomasse de départ. Les recherches d'INRAE ont permis d'identifier les principaux points d'attention. L'un d'entre eux concerne l'azote. En effet, l'azote des digestats se trouve sous forme d'ammoniac, plus facilement assimilable par les végétaux, mais présentant des risques de dispersion dans l'atmosphère et de pollution, en tant que précurseur de particules fines. La solution consiste à épandre les digestats avec des épandeurs spéciaux, ou « pendillards », qui permettent de les enfouir rapidement. La période d'épandage est aussi à étudier pour bénéficier au mieux à la culture alimentaire suivante et pour éviter que l'azote ne se retrouve dans l'eau s'il n'est pas utilisé par les végétaux, par exemple en fin de

printemps et avant les semis pour le maïs, en automne pour les colzas semés en fin d'été.

En ce qui concerne les apports en matière organique et le stockage de carbone, des travaux de modélisation d'INRAE sur la paille montrent que le prélèvement de la biomasse pour la méthanisation est le plus souvent compensé par la restitution des digestats au sol. Pour 50 % des sols français, le stock de carbone au bout de 100 ans est plus élevé en épandant le digestat qu'en laissant la paille au sol (+ 0,8 %). Les digestats issus

Lorsqu'elle est laissée au sol, la biomasse agricole résiduelle constitue une source de matière organique et de nutriments.

→

RÉSUMÉ DES ATOUTS ET LIMITES DE LA MÉTHANISATION AGRICOLE		
	 ATOUTS	 POINTS DE VIGILANCE / LIMITES
MÉTHANISEUR	Production d'énergie renouvelable : chaleur, électricité, biocarburant (bioGNV)	Coût du méthaniseur, coût en énergie du procédé, biomasse disponible, perception sociétale
CIVE (CULTURE INTERMÉDIAIRE À VOCATION ÉNERGÉTIQUE)	Anti-érosion, structure et capacité de rétention d'eau du sol, lutte contre les adventices, apport de matière organique et stockage de carbone	Concurrence possible avec les cultures alimentaires si conduite trop intensive
DIGESTAT, RETOUR AU SOL	Fertilisation du sol (azote, phosphore, potassium)	→ Excès de nutriments, nitrate dans l'eau, eutrophisation/apports contrôlés, choix des méthodes et périodes d'épandage → Impacts sur la biodiversité du sol encore peu connus
	Azote sous forme minérale directement assimilable par les végétaux	Azote sous forme d'ammoniac : pollution de l'air/épandage nécessitant un enfouissement rapide
	Matière organique stabilisée, meilleur stockage de carbone	Perte de carbone labile par le procédé de méthanisation
ÉCONOMIE	Revenus pour les agriculteurs, emplois	Fragilité de certains modèles économiques

des autres voies d'obtention du biométhane sont encore plus intéressants : les « biochars » obtenu après pyrogazéification (voir ci-après) augmentent le stock de carbone au bout de 100 ans dans tous les sols (+ 100% sur plus de la moitié des sols)⁴.

D'autres travaux d'INRAE montrent que l'on peut post-traiter les digestats avant leur épandage pour séparer la phase solide, fibreuse, riche en carbone organique (amendement de fond) et la phase liquide, plus riche en nutriments. Ce traitement permet d'ajuster finement la restitution au sol suivant les besoins, la phase solide servant d'amendement de fond et la phase liquide de fertilisant.

Un processus mal ou méconnu dans la société

Un sondage d'Opinion Way (2021) révèle que seulement 22% des Français savent et peuvent expliquer ce qu'est le biogaz. 46% des personnes interrogées considèrent qu'il est source de mauvaises odeurs, 44% qu'il peut être dangereux, 36% qu'il entraîne la pollution des sols et de l'eau. 71% pensent que la méthanisation est source d'emplois locaux. Éléments de réponse de Nicolas Bernet, qui dirige le LBE à l'INRAE de Narbonne :

→ mauvaises odeurs : les digestats, comme les composts, dégagent une faible odeur rappelant l'humus des sols. Les mauvaises odeurs proviennent surtout des déchets avant méthanisation qu'il faut couvrir pendant les phases de collecte et de stockage ;

→ dangerosité : les fuites éventuelles de méthane posent davantage un problème environnemental que de dangerosité, car le méthane est un GES dont le pouvoir de réchauffement est beaucoup plus élevé que celui du CO₂. Pour éviter les fuites, les installations doivent répondre à une réglementation stricte ;

→ pollution des sols et de l'eau : la composition et les conditions d'épandage des digestats sont réglementées et contrôlées en France. Les digestats d'origine agricole, comme toutes les matières fertilisantes, doivent être gérés de façon raisonnée pour ne pas polluer le sol, mais lui apporter au contraire des éléments minéraux et de la matière organique stabilisée ;

→ emplois : en 2018, 4 000 emplois ont été générés. Ce nombre pourrait passer à 53 000 d'ici à 2030.



SUR LE TERRAIN Regards croisés sur un méthaniseur

La coopérative EMC2, basée à Bras-sur-Meuse (près de Verdun) a initié plusieurs projets de méthaniseurs associant au total une quinzaine d'exploitations. Grâce à l'outil de modélisation Maelia, les chercheurs d'INRAE peuvent contribuer à optimiser ces systèmes.

**CHRISTOPHE CLESSE, CHEF DU
PROJET MÉTHANISATION À EMC2**

« Installer un méthaniseur représente un investissement consé-

quent. Dans notre modèle, ce coût est pris en charge par la coopérative. Ensuite, la coopérative achète la biomasse des CIVE aux agriculteurs à un prix stable. Les agriculteurs rachètent le digestat en sortie de méthaniseur, à un prix attractif, et peuvent l'épandre sur leurs terres. Ils bénéficient aussi des avantages agronomiques des CIVE, particulièrement pour contenir les adventices. Avec les éleveurs, nous pratiquons un échange : ils livrent leurs effluents à la coopérative et reçoivent en retour les digestats. La coopérative prend en charge le transport des effluents et l'épandage des digestats. Elle traite les effluents frais au fur et à mesure de leur production, ce qui évite aux éleveurs de les stocker et leur permet parfois de réaliser une nouvelle mise aux normes. La coopérative vend le biométhane obtenu. Le premier de nos méthaniseurs, installé en octobre 2021, produit 175 m³ de gaz par heure, ce qui, sur une année, fournit le chauffage à 1400 foyers. Notre système est vertueux sur le

plan environnemental : toutes les exploitations sont situées à moins de 10 km de l'installation, et nous visons à diminuer l'usage d'énergie fossile, en optimisant le processus, et en utilisant des panneaux photovoltaïques sur les toits, ainsi qu'une partie du biogaz obtenu pour l'autoconsommation d'électricité ».

**OLIVIER THEROND, AGRONOME
AU CENTRE INRAE DE COLMAR**

« Nous avons été mis en contact avec le service Agronomie de la coopérative et nous avons mis en place une collaboration. L'outil Maelia que nous développons à INRAE va permettre de suivre de manière fine le fonctionnement du système exploitations-méthaniseur et de l'optimiser. Pour l'instant, nous achevons sa configuration avec les données d'entrée : type de sol, climat, types de rotations et pratiques culturales, composition du digestat, etc. Ensuite, le modèle permettra d'optimiser les CIVE et les modalités d'épandage des digestats. Ces projets de méthanisation peuvent amener les agriculteurs vers plus de diversité culturale, avec des rotations plus variées et plus longues. »

CHRISTOPHE CLESSE

« Les agriculteurs se sont approprié le système, certains ont même acheté le matériel d'épandage. Si certains craignent que la méthanisation aboutisse à une disparition progressive de l'élevage, par détournement de l'usage des cultures, ce n'est pas mon sentiment, car, au contraire, la valorisation des effluents en biométhane et le retour sous forme de digestats inodores enlèvent un grand poids dans la gestion des élevages. D'autre part, dans notre contrat, les agriculteurs/éleveurs ne consacrent pas plus de 20 % de leur surface à la méthanisation. »

Valoriser les déchets ménagers en ville

La méthanisation n'est pas seulement une solution pour produire de l'énergie, c'est aussi un outil d'économie circulaire puisqu'elle permet de traiter de nombreux types de déchets organiques. D'ici 2050, près de 7 personnes sur 10 devraient vivre en zone urbaine en France, produisant des déchets biodégradables à hauteur d'un tiers de leurs ordures ménagères, un véritable gisement de ressources valorisables. « *Nous avons développé et testé grandeur nature un système de micro-méthanisation en milieu urbain, à Ecully, près de Lyon, capable de produire, à partir des biodéchets, du biométhane pour de l'énergie locale. Le digestat est utilisé comme substrat pour cultiver des bactéries à propriétés insecticides, constituant un biopesticide valorisable sur les cultures maraîchères* », explique Anne Trémier, chercheuse au centre INRAE de Rennes. À l'instar de ce biopesticide, les digestats non épandables pourraient être utilisés pour produire des molécules à haute valeur ajoutée, dont des acides gras pour la chimie et de l'hydrogène. Sur le plan environnemental et socio-économique, les résultats permettent d'envisager concrètement

↓
**Projet FELeaks :
 méthode innovante
 pour mesurer les
 émissions fugitives
 de biogaz.**
 UR OPAALE -
 Centre INRAE
 Bretagne-
 Normandie.

© INRAE – Thierry Bioteau

le déploiement de ce système, à l'échelle d'unités de 800 à 1000 ménages⁵.

Pour une gestion territoriale

Un méthaniseur dimensionné à l'échelle territoriale peut drainer des sources de biomasse à la fois agricoles et non agricoles (déchets verts urbains, résidus d'industries agroalimentaires, voire boues de stations d'épuration). Dans ces mélanges, c'est l'intrant majoritaire qui détermine les caractéristiques du digestat. À partir des travaux d'INRAE, un outil en ligne gratuit, financé par l'Ademe, permet d'anticiper précisément le type de digestat obtenu et son potentiel en termes de fertilisation et d'apport de carbone.

La méthanisation des boues de stations d'épuration urbaines permet de valoriser l'ensemble des eaux usées collectées au niveau d'une station en produisant du biométhane injecté dans le réseau gazier. Aujourd'hui, c'est le cas pour 43 stations d'épuration en France (soit 0,2%) qui produisent 500 GWh/an, tandis que le potentiel est estimé à 2 TWh/an⁶. Le digestat issu de cette méthanisation peut être épandu sur les champs voisins sous des conditions réglementaires strictes : contrôle de la qualité agronomique, normes en termes de microorganismes pathogènes et d'éléments traces métalliques (cuivre, zinc, mercure, cadmium) et modalités d'épandage.

Optimiser l'organisation territoriale, c'est aussi positionner les méthaniseurs à proximité des réseaux de chauffage urbain, pour récupérer les grandes quantités de chaleur produite par la méthanisation, qui sont sinon perdues. De même, le CO₂ contenu dans le biogaz, qui est actuellement éliminé, pourrait être injecté dans l'atmosphère des serres pour favoriser la photosynthèse, ce qui est fait actuellement en brûlant du gaz.

Biométhane et hydrogène : deux partenaires interchangeables

Beaucoup de recherches et de promesses portent sur l'hydrogène (H₂) en tant que forme de stockage d'énergie. Ce stockage est particulièrement important pour lisser la production des énergies renouvelables intermittentes comme le solaire et l'éolien. On peut stocker l'électricité en excès sous forme d'hydrogène par électrolyse de l'eau (H₂O → H₂ + O₂). Le rendement de conversion (30-40%) est néanmoins moins élevé qu'avec



d'autres formes de stockage comme les batteries ou les STEP (70-80 %) (voir p.14). Autre inconvénient : l'hydrogène est difficile à transporter car c'est un gaz léger qu'il faut comprimer à 700 bars ou liquéfier à -253 °C et qui est inflammable et potentiellement explosif dans certaines conditions. Une autre solution consiste à convertir l'hydrogène en méthane, par le processus de méthanation : $\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4$. On appelle cette technologie « power to gas » (= électricité sous forme de gaz).

Il faut noter qu'actuellement l'essentiel de l'hydrogène est produit à partir d'électricité d'origine fossile (gaz, charbon, pétrole) ou par réformage du gaz fossile ($\text{CH}_4 \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$). Ces procédés sont moins coûteux que l'hydrolyse de l'eau, mais plus impactants en termes de changement climatique. INRAE s'intéresse à une autre source d'hydrogène : celui qui se forme naturellement comme intermédiaire de méthanisation. Cette production d'hydrogène par voie biologique (biohydrogène) est encore moins impactante que l'électrolyse, laquelle nécessite des composants ayant une empreinte carbone non négligeable (électrodes, membranes). « *En réalité, on réalise ce processus en 2 étapes : production d'hydrogène dans un petit fermenteur, avec seulement une quinzaine d'espèces microbiennes majoritaires, puis injection de cet hydrogène dans le méthaniseur pour l'étape de méthanation, par interaction avec le CO_2 présent dans le méthaniseur* », détaille Éric Trably, directeur adjoint du LBE à Narbonne. Le rendement global en biométhane du couple fermenteur/méthaniseur est ainsi augmenté. La construction d'un prototype utilisant cette méthanation in situ est prévue en 2024. ●

1. Lire l'article :

url.inrae.fr/3qZq82j

2. Exemples de CIVE : en cultures d'hiver : raygrass, triticale, seigle, avoine.

En cultures d'été : sorgho, pois, tournesol.

Par rapport à la ressource en eau, privilégier les CIVE d'hiver et/ou semer tôt les CIVE d'été.

3. Pour la méthanisation,

l'utilisation de ces cultures dédiées est limitée en France à 15 % en tonnage, décret n° 2022-1120 du 4 août 2022.

4. Andrade C. et al. (2023). bit.ly/3GrJYJT

5. Lire l'article *Projet Decisive*, EU 2016-2021 : url.inrae.fr/3ITMVJG

6. Source : url.inrae.fr/40bKhI4

BIOGAZ

Exploration des voies émergentes

Outre la méthanisation, qui est actuellement la voie prépondérante pour la production de biogaz, il existe 3 autres procédés en cours de développement.

La pyrogazéification nécessite un chauffage à haute température mais permet d'utiliser les résidus forestiers, voire des plastiques. Le « power-to-gas » ou méthanation permet de produire du méthane à partir d'hydrogène et de CO_2 et représente une voie de stockage d'électricité. Enfin, la gazéification hydrothermale repose sur un procédé thermo-chimique à haute pression et à haute température pour convertir en méthane des déchets organiques liquides dotés d'un faible taux de matière sèche (entre 5 et 25 %).

En considérant ces technologies à l'échelle de la France, une étude menée sous l'égide de la CRE [Commission de régulation de l'énergie], impliquant INRAE, estime qu'il serait réaliste de remplacer 10 % du gaz fossile (environ 40 TWh) par du biométhane d'ici 2030 sans incidence sur la production alimentaire, ni impacts négatifs sur l'environnement. Le coût serait justifié si l'on considère les dépenses évitées : émissions de GES,

économie de traitement des déchets, bénéfiques en termes de création d'emploi, de biodiversité, etc.¹

Une autre prospective menée à l'échelle régionale, en Occitanie, montre que la consommation actuelle de gaz (17,5 TWh) pourrait être entièrement couverte par la production de biométhane en 2050, en considérant les différentes technologies de production de biométhane à leur niveau optimum et l'ensemble des ressources potentiellement disponibles, sans mettre de restriction d'ordre économique ou environnemental. « Notre étude montre que le potentiel en biométhane est considérable et sous-employé en Occitanie, en particulier pour les CIVE. Même si leur bénéfice économique n'est pas évident actuellement, car elles ne sont pas très productives, il pourrait s'affirmer quand le marché du biogaz sera mieux structuré, de même que celui de la séquestration du carbone », note Lorie Hamelin, titulaire de la chaire INRAE sur les transitions vers des économies à bas-carbone fossile.

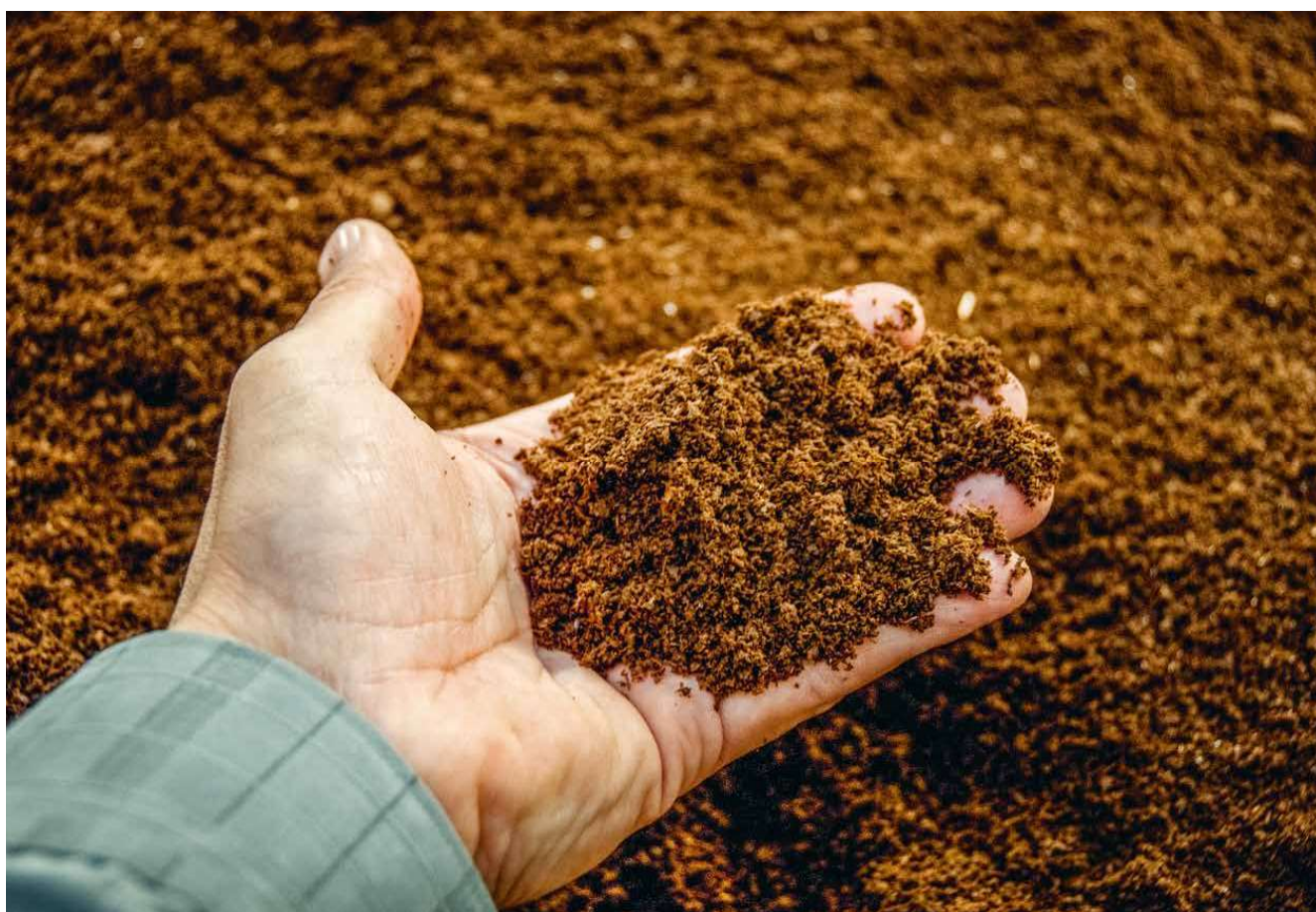
1. url.inrae.fr/2IYBNKK

BIOCARBURANTS

UNE SOLUTION QUI ROULE

La Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) vise la décarbonation quasi totale du secteur des transports d'ici à 2050. Tandis que l'électrification est privilégiée pour les véhicules légers, les analyses environnementales poussent la recherche à développer de nouveaux biocarburants pour les véhicules lourds et les transports maritimes et aériens.

État des lieux.



Les biocarburants dits de 1^{re} génération actuellement présents sur le marché sont issus de cultures alimentaires : betterave, maïs, blé pour la production de bioéthanol, colza et tournesol pour le biogazole. Ces biocarburants peuvent généralement être utilisés dans les véhicules actuels. Ils sont le plus souvent mélangés à part variable avec des carburants fossiles, mais le biogazole peut être utilisé pur dans certains moteurs et le superéthanol-E85 contient jusqu'à 85 % de bioéthanol en volume. Les biocarburants de 1^{re} génération sont en concurrence directe avec les cultures à usage alimentaire. C'est pourquoi l'UE a limité à 7% la quantité de biocarburants d'origine agricole pouvant être utilisée dans le secteur des transports. Grâce aux travaux de recherche, une 2^e génération de biocarburants a vu le jour. Ils peuvent être obtenus à partir de biomasse non alimentaire : résidus de culture, cultures dédiées ou encore résidus forestiers. Les biocarburants de 3^e génération, issus de microalgues, représentent une piste prometteuse mais encore expérimentale.

Les biocarburants de deuxième génération sont matures

Les travaux d'INRAE¹ ont contribué à mettre au point un procédé pour produire du bioéthanol de 2^e génération, à partir d'une biomasse végétale variée : coproduits agricoles (pailles, rafles de maïs, bagasse), coproduits forestiers ou encore plantes dédiées (miscanthus, switchgrass, sorgho fibre, canne énergie, cultures ligneuses à courte rotation).

Les chercheurs d'INRAE ont en particulier développé les procédés de dégradation du bois : hydrolyse de la cellulose et fermentation des sucres en éthanol. Les enzymes d'hydrolyse proviennent de champignons qui se développent naturellement sur le bois. Ces enzymes se sont perfectionnées au cours de l'évolution. Celles qui digèrent la cellulose, les cellulases, ont été découvertes lors de la seconde guerre mondiale parce qu'elles dégradaient les vêtements en coton des militaires américains. « Depuis 2010, nous avons mis en évidence à INRAE une autre sorte d'enzymes : des oxydases. Ce sont des enzymes clés car elles agissent à la surface de la cellulose et facilitent l'action des cellulases. Ainsi, on comprend mieux le processus de dégradation du bois par les champignons et on peut continuer à optimiser les procédés », explique Jean-Guy



↑
Champignon *Fomitopsis pinicola*, un dégradeur de bois nécessaire pour libérer les composés essentiels à la fabrication de carburants renouvelables.

© INRAE - David Navarro

Berrin, chercheur au centre INRAE Provence-Alpes-Côte d'Azur. En effet, le bois est difficile à dégrader complètement, car, outre la cellulose, il contient 20 à 30% de lignine, une molécule complexe plus difficile à digérer, quoique très intéressante pour la chimie, car pouvant servir de matière première pour la fabrication de résines ou de colles.

Dans le procédé Futurol, toutes les étapes ont été optimisées : le prétraitement de la biomasse végétale, la production des enzymes de champignons, la digestion enzymatique de la biomasse et la production d'éthanol. C'est un modèle d'économie circulaire, puisque la lignine non digérée génère de l'énergie par combustion, tandis que d'autres résidus sont utilisés comme fertilisants ou biomatériaux. Au total, les installations ont un bilan positif en énergie, avec un prix de revient compétitif pour l'éthanol. Le rendement de conversion en sucres obtenu pour la paille de blé est de 100 %, et la possibilité d'utiliser d'autres substrats permet une alimentation toute l'année. INRAE a suivi le procédé depuis la recherche en laboratoire jusqu'à la phase industrielle, une belle →



Le bioGNV est moins émetteur de particules fines que l'essence et le gazole, et a un impact carbone pratiquement nul.

réussite en termes de recherche et développement. « *Cependant, alors que le Brésil et les États-Unis commercialisent ces biocarburants de 2^e génération, les investisseurs français restent plus frileux. Seule la société Axens s'est lancée dans la commercialisation et a signé un accord de licence avec la Croatie* », conclut Jean-Guy Berrin.

Le biogaz naturel véhicule (bioGNV), un carburant intéressant pour les véhicules lourds

Le bioGNV est tout simplement du biométhane obtenu par la méthanisation de biomasse et la purification du biogaz (voir p. 32). Moins émetteur de particules fines que l'essence et le gazole, et à impact carbone pratiquement nul, il peut être utilisé principalement dans les véhicules lourds (camions, cars et bus) sous forme comprimée à 200-250 bars dans des réservoirs spéciaux, ou sous forme liquide après refroidissement à -163 °C. Le bioGNV est déjà employé pour les transports publics dans certaines villes françaises comme Lorient.

Carburants d'avenir pour l'aviation

Une étude pionnière d'INRAE compare les impacts environnementaux de 4 procédés innovants de motorisation décarbonée pour les avions, grâce une analyse de cycle de vie (ACV) comportant 16 indicateurs (voir p. 33).

Cette ACV montre que les 2 procédés les moins dommageables pour le changement climatique à court terme sont les batteries électriques lithium-ion et l'hydrogène liquide. Ainsi, le scénario le plus intéressant en termes d'impact climatique est le scénario 100 % électrique, à condition que l'électricité soit d'origine renouvelable.

←
Stockage de
balles de paille
(biomasse).
Centre de
recherche Hauts-
de-France.
© INRAE –
Gérard Paillard

Cependant, cette filière serait limitée aux vols courts. Pour les longues distances, le recours à un mix avec du kérosène fossile (court-terme) ou biocarburants liquides (long-terme) serait nécessaire. L'autre scénario intéressant, l'hydrogène liquide, pose des défis techniques : l'hydrogène liquide occupe de la place et alourdit l'avion, ce qui limite le nombre de passagers. Airbus s'intéresse de près à cette technologie¹.

Le troisième procédé étudié, qui utilise les résidus d'huile de cuisson, est déjà employé par certaines compagnies (Scandinavian Airlines). Cependant, il nécessite un mélange avec du kérosène à hauteur de 50 % (et dans certains cas 90 %) car les huiles ne sont pas assez riches en composés aromatiques, ce qui affecte les joints des circuits de carburant. Pour augmenter leur part dans le mélange, il faudrait enrichir les huiles en composés aromatiques ou travailler sur ces joints. L'analyse tient compte aussi des usages substitués : par exemple, en termes d'ACV, il est plus intéressant de brûler les huiles de cuisson pour fournir du gaz de chauffage que de les utiliser pour les avions. Enfin, le 4^e procédé, appelé « power-to-jet », consiste à produire du kérosène à partir d'hydrogène et de CO₂ capté dans l'atmosphère. La capture du CO₂ atmosphérique, ou « direct air capture » consiste à capter du CO₂ dans l'air et à le concentrer sur des adsorbants liquides ou solides. C'est une technologie en développement, déjà présente en Islande et au Canada.

« *L'originalité de cette étude sur les carburants pour l'aviation réside dans le fait qu'elle prend en compte aussi bien les biocarburants que le 100 % électrique, le 100 % hydrogène ou encore le power-to-jet, un procédé très novateur, ce qui n'avait jamais encore été fait* », souligne Lorie Hamelin. ●

1. url.inrae.fr/49bo5vG