



## Installations de biogaz en Allemagne : Répercussions économique-écologiques au-delà du marché de l'électricité, et scénarios d'évolution du parc jusqu'en 2035

Mars 2020

Auteurs :

Patrick Matschoss, Collaborateur scientifique, Institut des systèmes énergétiques du futur (IZES) - [matschoss@izes.de](mailto:matschoss@izes.de)

Joachim Pertagnol, Collaborateur scientifique, IZES - [pertagnol@izes.de](mailto:pertagnol@izes.de)

Bernhard Wern, Responsable du domaine de recherche Flux de matières, IZES - [wern@izes.de](mailto:wern@izes.de)

Martin Dotzauer, Collaborateur scientifique,

Centre allemand de recherche sur la biomasse (DBFZ) - [martin.dotzauer@dbfz.de](mailto:martin.dotzauer@dbfz.de)

Contact :

Lena Müller-Lohse, Chargée de mission, OFATE - [lena.muller-lohse@developpement-durable.gouv.fr](mailto:lena.muller-lohse@developpement-durable.gouv.fr)

Soutenu par :



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Soutenu par





## Disclaimer

Le présent texte a été rédigé par des experts externes pour l'Office franco-allemand pour la transition énergétique (OFATE). L'OFATE se borne à fournir aux auteurs une plate-forme pour la publication de leur contribution. Les points de vue énoncés dans la note représentent donc exclusivement ceux des auteurs. La rédaction a été effectuée avec le plus grand soin. L'OFATE décline toute responsabilité quant à l'exactitude et l'exhaustivité des informations contenues dans ce document.

Tous les éléments de texte et les éléments graphiques sont soumis à la loi sur le droit d'auteur et aux autres lois de protection. Ces éléments ne peuvent être reproduits, en partie ou entièrement, que sur autorisation écrite de l'auteur et de l'éditeur. Ceci s'applique en particulier à la reproduction, l'édition, la traduction, le traitement, l'enregistrement et la reproduction dans des bases de données ou autres médias et systèmes électroniques.

L'OFATE ne dispose d'aucun moyen de contrôler les sites accessibles depuis les liens figurant dans le présent document. Un lien vers un site externe ne saurait engager la responsabilité de l'OFATE quant au contenu du site, sa fréquentation ou ses effets.

## Note sur les auteurs de la publication

L'Institut des systèmes énergétiques du futur (IZES gGmbH) soutient le développement de la science, notamment par la recherche et le développement orientés vers les applications dans le domaine de la transition énergétique. À cette fin, il mène des activités de conseil, d'accompagnement et de réalisation de projets dans les domaines des marchés de l'énergie, des flux de matières, des infrastructures et du développement municipal, de l'innovation technique et de la psychologie environnementale. L'IZES est situé à Sarrebruck et dispose d'un bureau à Berlin. Son principal actionnaire est le Land de la Sarre.

Le Centre allemand de recherche sur la biomasse (DBFZ) est un institut de recherche et développement spécialisé dans les questions relatives à l'exploitation énergétique et matérielle des matières premières renouvelables dans la bioéconomie. Ses travaux sont notamment dédiés aux technologies innovantes, à leur application économique et à leurs effets sur les différents écosystèmes. Le DBFZ développe dans ce cadre divers concepts pour une utilisation énergétique de la biomasse réunissant viabilité économique, sécurité écologique et acceptabilité sociale, dans une approche systémique tenant compte des éventuelles tensions entre les différents objectifs.

Patrick Matschoss est économiste ; il travaille à l'IZES depuis 2016 dans le domaine des marchés de l'énergie, et partage son temps depuis 2018 entre le domaine des flux de matières et celui des marchés de l'énergie.

Joachim Pertagnol est agronome (Master of Science) et travaille à l'IZES depuis 2015 dans le domaine des flux de matières.

Bernhard Wern, diplômé en sylviculture, travaille à l'IZES dans le domaine des flux de matières depuis 2009 ; il y a été nommé responsable du domaine de recherche en 2016.

Martin Dotzauer est collaborateur scientifique au DBFZ depuis 2013 ; ses travaux, dans le domaine des systèmes bioénergétiques, ont trait à la flexibilisation des installations bioénergétiques dans le secteur de l'électricité et de la chaleur, et à leur intégration dans le cadre de la transition énergétique.



## Synthèse

Cette note reprend les éléments d'un rapport final rédigé dans le cadre du projet de recherche « *MacroBiogas* ». Elle s'emploie tout d'abord à exposer les effets du parc allemand d'installations de biogaz dans d'autres domaines que celui de la production d'électricité, et en premier lieu les répercussions sur les processus naturels et les activités agricoles que sont les sols et leur exploitation, les services écosystémiques, le recyclage et l'élimination ainsi que la réduction des gaz à effet de serre non énergétiques. Pour ces services supplémentaires, actuellement cofinancés par Loi allemande sur les énergies renouvelables (EEG), il a été procédé dans la mesure du possible à des estimations quantitatives ou financières.

La note présente ensuite des scénarios d'évolution du parc d'installations de biogaz en Allemagne, compte tenu des réductions significatives des subventions jusqu'en 2035 introduites en 2014 et en 2017 par les modifications de la loi EEG. Ces scénarios vont de la « disparition progressive du parc » au « maintien du parc ». Pour le scénario « disparition progressive du parc », la note développe en outre les implications pour le système énergétique, qui requerrait que d'autres technologies se substituent à l'électricité et la chaleur renouvelables ainsi qu'aux services contrôlables du modèle précédent. Ces questions gagneront particulièrement en importance à partir du milieu des années 2020, une grande partie du parc d'installations de biogaz étant alors amenée à ne plus bénéficier du tarif d'achat fixe introduit par la loi EEG.



# Sommaire

<b>Disclaimer</b>	<b>2</b>
<b>I. Introduction</b>	<b>5</b>
<b>II. Panorama du parc allemand d'installations de biogaz</b>	<b>5</b>
<b>III. Les installations de biogaz, interface avec les processus naturels et agricoles</b>	<b>7</b>
III.1. Périmètre d'efficacité des installations de biogaz : plus que de simples producteurs d'électricité	7
III.2. Répercussions sur les sols	8
III.3. Répercussions sur l'exploitation des sols et les services écosystémiques	10
III.4. Répercussions sur le recyclage et l'élimination	11
III.5. Répercussions sur la réduction des gaz à effet de serre (non énergétiques)	11
<b>IV. Scénarios d'évolution du parc d'installations de biogaz en Allemagne à horizon 2035</b>	<b>13</b>
IV.1. Facteurs d'évolution, données de base et aperçu des scénarios	13
IV.2. Scénario 1 (scénario de référence) : disparition progressive du parc	14
IV.3. Scénario 2 : processus d'appel d'offres	15
IV.4. Scénario 3 : maintien du parc	16
IV.5. Importance de la bioénergie pour le système des énergies renouvelables : compensation nécessaire jusqu'en 2035 de l'électricité et de la chaleur renouvelables ainsi que de la flexibilité, selon le scénario de référence	17
<b>V. Synthèse et conclusions</b>	<b>20</b>



## I. Introduction

Le tarif d'achat prévu par la Loi allemande sur les énergies renouvelables (EEG) s'est révélé être un instrument efficace pour le développement technologique et le financement des énergies renouvelables. La baisse continue des tarifs observée dans les filières éolienne et photovoltaïque ne s'est pas produite pour les bioénergies et, notamment, n'a pas affecté les installations de biogaz. Celles-ci ont connu, en dépit d'une baisse structurelle des taux de rachat, des hausses de tarif à partir de 2009, le phénomène étant notamment nettement observable en 2012. Cette situation s'explique par les primes spéciales que la loi EEG a introduites, dans une approche du développement du biogaz englobant, outre la stricte production d'électricité, des aspects tels que la conservation des paysages, la protection de la nature, la structure de l'agriculture, la politique en matière de ressources ou la protection contre les émissions nocives.<sup>1</sup> Ainsi la loi EEG, conçue uniquement à l'origine pour le secteur de l'électricité, couvre-t-elle et impacte-t-elle économiquement des domaines qui ne sont a priori pas associés à la production d'électricité ni, plus généralement, à l'industrie énergétique. C'est de ce constat qu'est partie l'analyse menée au cours du projet de recherche *Makro-Biogas*<sup>2</sup>, financé par l'Agence technique allemande pour les ressources renouvelables (*Fachagentur für Nachhaltige Rohstoffe*, FNR).

La présente note reprend les principales conclusions du rapport final du projet. Elle s'emploie tout d'abord à exposer les répercussions du parc allemand d'installations de biogaz dans d'autres domaines que celui de la production d'électricité, et en premier lieu les effets latéraux sur les processus naturels et agricoles que sont les sols et leur exploitation, les services écosystémiques, le recyclage et l'élimination ainsi que la réduction des gaz à effet de serre non énergétiques. Ces services supplémentaires, actuellement cofinancés par la loi EEG, font l'objet, dans la mesure du possible, d'estimations quantitatives ou financières.

La note présente ensuite des scénarios d'évolution du parc allemand d'installations de biogaz, compte tenu des réductions significatives des subventions à horizon 2035 introduites en 2014 et en 2017 par les modifications de la loi EEG. Ces scénarios vont de la « disparition progressive du parc » au « maintien du parc ». Pour le scénario « disparition progressive du parc », la note développe en outre les implications pour le système énergétique, qui requerrait que d'autres technologies se substituent à l'électricité et à la chaleur renouvelables ainsi qu'aux services contrôlables du modèle précédent. Ces questions gagneront particulièrement en importance à partir du milieu des années 2020, une grande partie du parc d'installations de biogaz étant alors amenée à ne plus bénéficier de la rémunération fixe introduite par la loi EEG (pour les installations dites « post-EEG »).

## II. Panorama du parc allemand d'installations de biogaz

Le parc actuel d'installations de biogaz est présenté dans le tableau 1 ci-dessous. Il est structuré par le principal instrument de financement en place qu'est la loi EEG, et compte environ 10 400 installations (telles que définies par la loi EEG) assurant une puissance installée  $P_{inst}$  d'environ 5 000 MW<sub>él</sub>. Les installations de biogaz sont couramment distinguées en fonction des classes de performance et de matières premières déterminées dans la loi EEG. Au vu des différentes classes de matières premières et des niveaux de rémunération variés introduits par les modifications apportées à la loi, on peut distinguer quatre catégories d'installations :

---

<sup>1</sup> Cf. prime à l'entretien du paysage, catégories de rémunération des matières premières déterminant entre autres la taille des parcelles, prime à la réduction du formaldéhyde, exclusion des déchets de bois du périmètre de la biomasse éligible à des subventions ; se reporter aux modifications de la loi EEG en 2009 et en 2012, et aux ordonnances associées.

<sup>2</sup> Projet de recherche « *Analyse der gesamtwirtschaftlichen Effekte von Biogasanlagen. Wirkungsabschätzung des EEG (MakroBiogas)* », avec le soutien de l'Agence technique allemande pour les ressources renouvelables (FNR) et du ministère fédéral de l'Alimentation et de l'Agriculture (BMEL). Le rapport de recherche est disponible (en allemand) via le lien suivant : <http://www.izes.de/de/projekte/makrobiogas>.



	Petites installations de traitement du lisier	Installations de biogaz valorisant les matières premières de recyclage	Centrales de cogénération à partir de biométhane	Installations de biogaz valorisant les déchets	Total
Nombre [n]	421	7 998	1 859	116	10 394
Puissance cumulée [MW <sub>él.</sub> ]	31,6	4 294,8	534,4	98,2	4 959
Proportion [%]	4,1	76,9	17,9	1,1	100
Puissance cumulée [%]	0,6	86,6	10,8	2,0	100

**Tableau 1:** Parc d'installations de biogaz en 2018. Source : Note de bas de page 2, tableau 1.

Les petites installations de traitement du lisier se voient fixer une part maximale de graines céréalières et de maïs de 20 % dans le substrat utilisé, et la loi EEG limite leur puissance électrique installée à 75 kW<sub>él.</sub>. Malgré le potentiel du lisier, par ailleurs largement sous-exploité, ces installations sont actuellement celles qui contribuent le moins à la production électrique totale des installations de biogaz. En raison du besoin élevé en chaleur des installations, seules de faibles quantités de chaleur peuvent être transmises à l'extérieur. Le périmètre de consommation de la chaleur est généralement limité à l'exploitation agricole (espace d'habitation et de travail).

La principale catégorie d'installations de biogaz est constituée de celles qui valorisent des matières premières de recyclage, c'est-à-dire la biomasse cultivée. Leur substrat principal est constitué de maïs, complété par l'ensilage de plantes entières, ainsi que d'un apport d'herbe et de lisier ou de fumier. Ces installations sont celles qui valorisent au total la plus grande quantité de lisier.

Du fait des structures de tarif d'achat prévues autrefois par la loi EEG, la puissance installée moyenne des installations est d'environ

500 kW<sub>él.</sub> ; elle va, selon les installations, de 30 kW<sub>él.</sub> à plus de 1 000 kW<sub>él.</sub>. Ces installations sont principalement dédiées à la production d'électricité. La chaleur produite est consommée à 20-25 % selon les cas par l'exploitation elle-même. Le reste est disponible pour un approvisionnement en chaleur externe. Les différentes modifications apportées à la loi EEG (avec ou sans la prime à la cogénération) et les localisations variées des installations donnent néanmoins lieu à des profils d'utilisation de la chaleur très hétérogènes.

Les centrales de cogénération à partir de biométhane représentent la troisième catégorie. Les installations de traitement et d'alimentation en biométhane ont une capacité moyenne de production de gaz brut de 630 Nm<sup>3</sup>/h. L'Allemagne compte actuellement près de 200 installations de traitement des gaz. Ces dernières n'étant pas directement bénéficiaires des tarifs d'achat institués par la loi EEG et approvisionnant le marché de la chaleur et des combustibles en plus des centrales de cogénération à partir de biométhane, les facteurs d'influence sont ici beaucoup plus complexes à établir. Cette étude ne traite donc pas explicitement des installations d'alimentation en gaz. Dans le tableau 1, la catégorie des centrales de cogénération à partir de biométhane ne représente que celles des centrales de cogénération dont le bilan manifeste qu'elles convertissent le biométhane, de manière décentralisée, en électricité et en chaleur et bénéficient d'un tarif d'achat de la loi EEG pour l'électricité injectée dans le réseau.

La quatrième catégorie d'installations étudiée dans le projet est constituée des installations de biogaz valorisant les déchets. En raison de la technologie onéreuse employée pour le traitement des (bio)déchets, ainsi que des conditions plus strictes pour obtenir une autorisation, on les retrouve également davantage dans des cas de puissance installée importante. La chaleur nécessaire au fonctionnement de l'installation (notamment pour l'assainissement, le chauf-



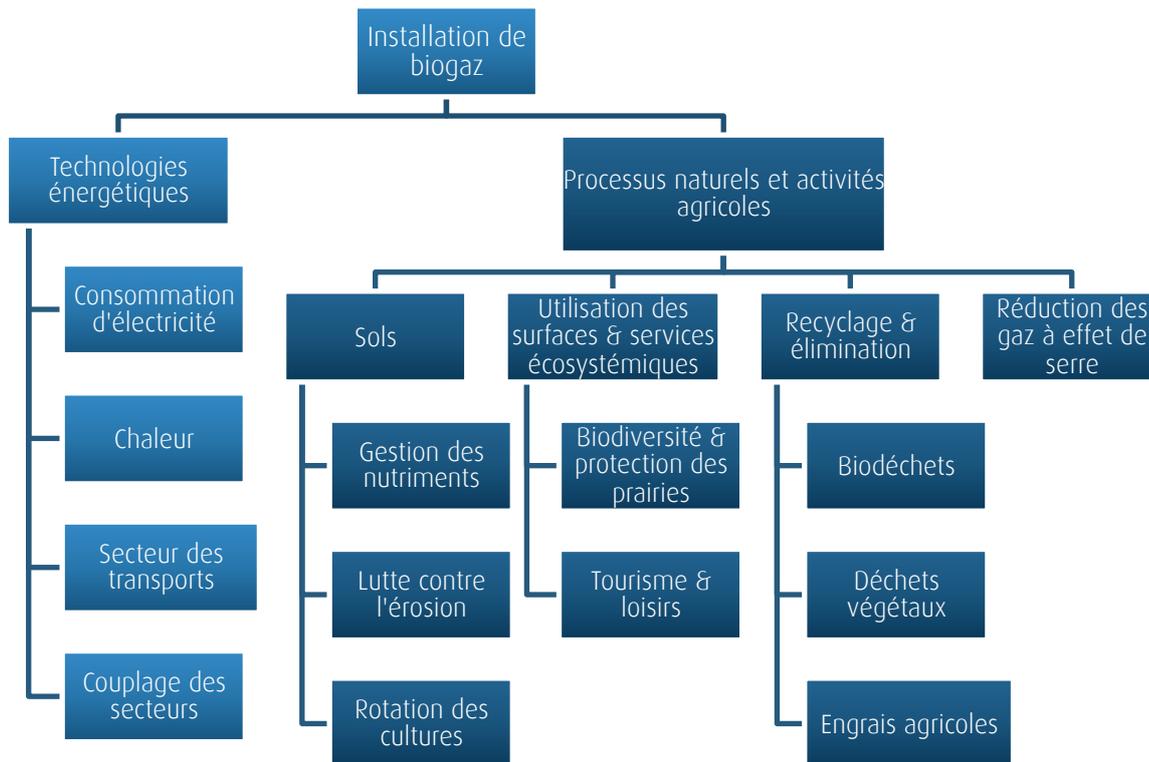
fage du fermenteur) peut être fournie par la centrale de cogénération dans le cas d'une production d'électricité sur place ou, dans le cas d'une alimentation en biométhane, par la production d'électricité à partir d'une partie du biométhane produit ou par la chaleur résiduelle issue des compresseurs de gaz en cas de pressions d'alimentation élevées.

Aujourd'hui, les acteurs publics privilégient de plus en plus les solutions de mobilité valorisant le biométhane dans la constitution du parc de véhicules publics (tels que les camions poubelle ou les bus). Les installations valorisant les déchets ainsi que les petites installations de traitement du lisier, dont la part dans le parc d'installations de biogaz n'est pas négligeable, font l'objet de dispositions spécifiques dans le texte actuel de la loi EEG.

### III. Les installations de biogaz, interface avec les processus naturels et agricoles

#### III.1. Périmètre d'efficacité des installations de biogaz : plus que de simples producteurs d'électricité

Multifonctionnelles et transsectorielles (cf. figure 1), les installations de biogaz gagnent à être envisagées sous plusieurs angles. Or leur principal instrument de financement en Allemagne est la loi EEG dont le domaine d'application est le marché de l'électricité. Aussi **les réflexions sur les installations de biogaz** sont-elles **principalement axées sur la politique énergétique** (généralement sur le marché de l'électricité, plus rarement sur le marché de la chaleur). Si la conscience de l'importance des installations de biogaz pour le secteur des transports et le couplage des secteurs commence à émerger, le **rôle qu'elles jouent dans les domaines des processus naturels et des activités agricoles** (et l'interaction de ceux-ci avec la politique énergétique) **demeure peu abordé** – d'où le développement qui y est consacré dans cette section. Il s'agit notamment des sols (gestion des nutriments, lutte contre l'érosion, rotation des cultures), de l'utilisation des surfaces et des services écosystémiques (biodiversité et protection des prairies, tourisme et loisirs), du recyclage et de l'élimination (biodéchets, déchets végétaux, engrais agricoles) ainsi que de la réduction des émissions de gaz à effets de serre (GES) d'origine non énergétique.



**Figure 1** : Fonctions diverses des installations de biogaz. Mise en forme : IZES et OFATE. Source : Note de bas de page 2, tableau 1.

Les installations de biogaz jouent donc à l'évidence un rôle dans de nombreux domaines d'activité au-delà du système énergétique, et entretiennent notamment de nombreuses interfaces avec les processus naturels et les activités agricoles. En particulier, le mode et la gestion des cultures de substrats dans les installations valorisant les matières premières de recyclage ont des effets décisifs dans presque tous les domaines d'activité liés à l'agriculture.

L'étude a structuré, synthétisé et - dans la mesure du possible - estimé quantitativement ces effets.<sup>3</sup> Ces estimations quantitatives n'ont néanmoins été possibles que dans quelques cas, sur la base d'hypothèses très simplifiées. Le cadre de l'étude n'a pas permis de procéder à une analyse plus détaillée déterminant quantitativement les effets en termes de ct/kWh par catégorie d'installations. Des travaux de recherche pourraient à l'avenir être consacrés à identifier les services écosystémiques, à la cartographie variée, en les rapportant au parc d'installations de biogaz lui aussi très hétérogène selon les régions. Le tableau 2 propose une synthèse de certains des services fournis par les installations de biogaz.

### III.2. Répercussions sur les sols

Le biogaz a un effet sur le sol par la culture de substrats (type de culture sélectionné, rotation des cultures, systèmes de cultivations, utilisation d'excréments d'animaux) et par l'épandage des résidus (quantité et techniques d'épandage). Notons toutefois que le biogaz est susceptible aussi bien de détériorer que d'améliorer la qualité des sols, selon la méthode de gestion retenue. Aussi les développements qui suivent n'abordent-ils pas tant l'état des lieux ou la diversité des effets de la production de biogaz sur le sol selon les régions, que le potentiel que représente la gestion du biogaz pour l'amélioration de l'état du sol par rapport à d'autres pratiques.

<sup>3</sup> Les calculs figurent au chapitre 4 de l'étude évoquée dans la note de bas de page 1.



Le mode et la gestion des cultures de substrats ont des effets décisifs sur la **gestion des nutriments**. La fertilisation et la protection des plantes jouent ici un rôle pour la protection de l'eau et leurs résultats sont d'autant meilleurs que les installations de biogaz emploient un substrat approprié.

### Focus : Lien entre la production de biogaz et la qualité de l'eau

Les nappes phréatiques allemandes sont parfois fortement chargées en nitrate. Cela s'explique notamment par la fertilisation azotée employée dans l'agriculture. Le surplus d'engrais minéraux ou de lisier qui n'est pas consommé par les plantes ni décomposé dans le sol est rejeté dans les nappes phréatiques sous forme de nitrate. Il incombe aux fournisseurs d'eau de veiller à ce que l'eau potable ne dépasse pas les limites de concentration prescrites. L'augmentation des niveaux de nitrate dans les nappes phréatiques les oblige à recourir à des mesures techniques onéreuses pour éliminer celui-ci.<sup>4</sup>

Les résidus d'une installation de biogaz peuvent en partie être mieux absorbés par les plantes que d'autres engrais, ce qui réduit l'apport de nitrate dans les nappes phréatiques et donne lieu à un cycle fermé des nutriments.

Le coût de la protection de l'eau a fait l'objet d'une estimation quantitative dans le cadre de la gestion des nutriments. Mais il est apparu très difficile de tirer des conclusions des données remontées du fait des différences observées selon les régions en matière de coût de traitement de l'eau dans les stations d'épuration. Le recours à des substrats peu chargés en nitrate pourrait baisser ces coûts à hauteur de 25 %. Si ces économies étaient reversées à titre incitatif à l'exploitant d'une installation de biogaz de 500 kW, cela représenterait environ 0,25 ct/kWh rapportés à la quantité totale d'électricité produite. Cependant, il faudrait que cette somme soit quadruplée pour compenser la perte financière provoquée par le changement de substrat. Les tarifs de rachat de l'électricité n'offrant pas, en l'occurrence, d'incitations à cette hauteur, il conviendrait de réfléchir à des mécanismes de financement tels que des contributions (volontaires) par les stations d'épuration du voisinage ou le recours, par exemple, à des redevances de captage d'eau.

Une meilleure utilisation des résidus par les installations de biogaz constitue une autre solution. La substitution des résidus à l'engrais minéral permettrait d'accroître le recyclage des nutriments, en particulier dans les régions à faible densité de bétail. Grâce à une bonne valorisation des résidus, associée à un équilibrage régionale de l'épandage du fumier agricole, les installations de biogaz peuvent contribuer à la mise en œuvre de la « Directive nitrates » de l'Union européenne. Dans les régions à forte densité de bétail, il est possible de baisser les coûts d'élimination en transformant les résidus en engrais biologiques certifiés.

La diversification des cultures énergétiques peut en outre contribuer à la **lutte contre l'érosion**. Dans ce domaine, les coûts de suppression des sédiments ont été évalués pour l'Allemagne, sur la base d'une extrapolation, à près de 14,7 millions d'euros ; ils sont générés par l'érosion du sol due à la culture de substrat. Des subventions en faveur des cultures de substrat réduisant l'érosion pourraient réduire les coûts engendrés par la culture de substrat issu de matières premières renouvelables. En outre, les systèmes ciblés de culture de substrat réduisant l'érosion peuvent avoir des effets bénéfiques pour l'ensemble du secteur agricole, car la réduction de la couche arable compromet également la fertilité du sol à long terme.

S'agissant de la **rotation des cultures**, l'accent mis sur le maïs ensilage a eu des effets contrastés sur la diversité des cultures, limitant celle-ci dans certaines régions et l'augmentant dans d'autres où le blé et le colza prédominent. Dans certaines conditions, le maïs ensilage peut aussi être remplacé sans pertes financières par des mélanges de fleurs, par de la betterave sucrière et par des plantes vivaces telles que les graminées de plein champ.

---

<sup>4</sup> Agence fédérale pour l'environnement, 2018, « Données sur la pollution des nappes phréatiques et de l'eau potable par les nitrates » (à consulter en allemand via ce [lien](#)).



En Allemagne, la **pression sur les terres agricoles**, due aux élevages et aux besoins en substrat des installations de biogaz, est particulièrement élevée dans le nord-ouest et le sud-est.<sup>5</sup> Une demande régionale élevée pour l'alimentation du bétail et pour l'approvisionnement des installations de biogaz suscite un risque de forte concentration de la culture du maïs sur les terres agricoles.

Toutefois, dans le contexte des catastrophes naturelles de 2018 et 2019, des changements à venir en matière de températures et de précipitations ainsi que de la répartition des précipitations annuelles, l'agriculture doit repenser sa gestion des terres arables en général et la rotation des cultures en particulier. Les substrats de biogaz non conventionnels peuvent participer de cette nouvelle stratégie.

### III.3. Répercussions sur l'exploitation des sols et les services écosystémiques

L'utilisation des terres et les services écosystémiques sont directement affectés par les pratiques en matière de cultures énergétiques. Ces effets sont particulièrement manifestes s'agissant de la production de substrats, des processus de production et de l'utilisation de résidus (résidus de fermentation). Selon les cas, les incidences sur les services écosystémiques peuvent être positives ou négatives.

S'agissant de la **biodiversité** et de la **protection des prairies**, il est régulièrement fait état d'un déclin de la biodiversité associé à la production de biogaz. Or cette corrélation n'a rien de systématique car la culture diversifiée de la biomasse décrite ci-dessus peut également contribuer à la préservation de la biodiversité. La variété de plantes susceptibles d'être utilisées pour produire du biogaz est plus large que n'en témoignent les choix actuels dictés par des contraintes économiques. Ainsi la culture diversifiée de matières premières de recyclage peut-elle avoir un impact positif sur la biodiversité et les services écosystémiques, pourvu que les efforts ne portent pas exclusivement sur la sécurité alimentaire et la production de fourrage.

Le recours aux plantes à fleurs en constitue un exemple dans le domaine de la biodiversité. Les prairies fleuries, bénéficiant principalement à la biodiversité des insectes, sont parfois rentabilisées par les installations de biogaz via une hausse du prix de l'électricité. Ainsi le programme dit de « l'électricité pour les abeilles » (*Bienenstrom*) prévoit-il une rémunération de l'électricité d'un centime supplémentaire par kilowattheure. Encore faut-il que les consommateurs d'électricité soient prêts à payer ce centime supplémentaire. Dans ce contexte, des plantes telles que la silphie perfoliée présentent de multiples avantages en matière de lutte contre l'érosion et de sauvegarde des plantes, outre la promotion de la biodiversité (tant en surface que dans le sous-sol).

Dans le domaine du **tourisme** et des **loisirs**, la conservation de la nature, l'apiculture, le tourisme et les installations de biogaz peuvent avoir des intérêts conjoints. Dans de nombreuses régions allemandes, le paysage joue un rôle essentiel dans le tourisme et les loisirs. L'élevage et l'utilisation de la prairie qui en découle constituent des caractéristiques de certaines de ces régions. Au fil des années, le déclin de l'élevage a bouleversé les paysages ruraux (problème de l'empiètement de la broussaille et disparition des prairies pauvres qui en résulte). La préservation de ces paysages ruraux peut donc également être justifiée par des intérêts économiques liés au tourisme et aux loisirs. Recycler l'herbe dans les installations de biogaz permet de préserver les paysages tout en tirant de la pousse de l'herbe une plus grande valeur ajoutée. Le rendement énergétique ainsi obtenu étant inférieur à celui du maïs, et les dépenses plus élevées, il est nécessaire de financer ces services rendus au secteur touristique. Les municipalités qui souhaitent préserver des zones de loisirs pour leurs résidents doivent se prêter au même raisonnement.

Ainsi les pratiques agricoles telles que la culture de prairies fleuries, outre leurs bienfaits pour la biodiversité évoqués ci-dessus, présentent-elles une valeur ajoutée pour le tourisme et les espaces de loisirs. Les prairies fleuries

---

<sup>5</sup> Cf. note de bas de page 2, figure 3.

abondant en insectes sont recherchées par promeneurs et touristes. On observe ainsi des confluences entre la conservation de la nature, l'apiculture et le tourisme ou les intérêts des communautés locales.

### III.4. Répercussions sur le recyclage et l'élimination

S'agissant des **biodéchets** et des **déchets verts**, il est possible, comme le prévoit le paragraphe 8 al. 1 de la Loi sur le recyclage (*Kreislaufwirtschaftsgesetz*, KrWG), d'assurer un recyclage d'excellente qualité dans les installations de biogaz à énergie positive (fermentation suivie d'un compostage). Le tarif de rachat institué par la loi EEG permet d'instituer des étapes de fermentation, soulageant ainsi le système de tarification de droit public tout en permettant une réduction des émissions de GES par rapport à la pratique exclusive du compostage. Or seul 25 % environ du biogaz récupéré fait actuellement l'objet d'un traitement préliminaire de dégradation anaérobie. Si l'on suppose par ailleurs qu'une part importante des déchets biologiques est toujours éliminée sous forme de déchets résiduels, le secteur du biogaz dispose encore d'un potentiel de croissance significatif dans le secteur des déchets.

Dans le domaine des biodéchets, un calcul se basant sur les rendements de gaz connus permet d'estimer à environ 35 €/t de biodéchets la réduction des coûts pesant sur les citoyens ; rapporté à l'ensemble des biodéchets collectés en Allemagne via le ramassage des poubelles à déchets organiques (soit 4,9 millions de t), cela permettrait de réaliser une économie totale des coûts d'élimination de près de 170 millions d'euros. Cependant, il convient de noter qu'actuellement tous les déchets organiques collectés ne font pas l'objet d'une valorisation énergétique.

Dans le domaine de la conservation des paysages et des prairies, les études établissent que le coût du substrat est nettement plus élevé pour l'herbe (11,20 ct/ kWh<sub>é</sub>) que pour l'ensilage de maïs (9,56 ct/ kWh<sub>é</sub>). En outre, une valorisation de l'herbe en toute sécurité suppose d'investir dans une technologie de traitement appropriée.

S'agissant des **résidus de fermentation**, comme évoqué ci-dessus, les installations de biogaz produisant des résidus fournissent une alternative biologique aux engrais minéraux. Dans l'agriculture biologique, par exemple, les exploitations ne pratiquant pas l'élevage peuvent obtenir des nutriments pour leurs cultures grâce aux résidus.

Dans le domaine de l'utilisation des résidus, la marge de revenu calculée dans le cadre du projet est relativement importante. Après déduction des coûts de séparation et de séchage, elle va de 2,90 €/m<sup>3</sup> à 10,30 €/m<sup>3</sup>. L'étendue importante de la concentration de composant de valeur n'est pas sans en compliquer la commercialisation. Toutefois, dans les régions caractérisées par un excédent d'engrais agricoles, les ventes sont indispensables et les producteurs sont prêts à élargir la fourchette de prix afin de respecter les limites prescrites en matière de bilan azoté.

En outre, le projet a estimé à environ 600 millions d'euros la valeur de l'espace destiné au stockage du lisier et du fumier dans les installations de biogaz et (co)financé en vertu de la loi EEG. Sans ce cofinancement, ces frais seraient à la charge du secteur agricole et en particulier des éleveurs, et se répercuteraient sur les prix de la viande et du lait. Les installations de biogaz acceptant de récupérer du fumier moyennant une compensation fixée par la loi EEG voient les investissements nécessaires à sa transformation couverts et réalisent une économie sur les coûts qu'aurait représenté l'achat de substrat de maïs.

### III.5. Répercussions sur la réduction des gaz à effet de serre (non énergétiques)

Le recours à la biomasse pour produire de l'énergie a des bienfaits directs pour l'environnement si elle se substitue aux énergies fossiles, qui émettent généralement davantage de gaz à effet de serre au cours de leur cycle de vie. Dans le cas de la biomasse cultivée, une attention particulière doit être accordée aux émissions en amont dans la chaîne de production, qui sont elles-mêmes déterminées par un certain nombre de variables dépendant du type de matière



première. Il s'agit principalement des dépenses en engrais azotés et en carburant pour le labourage, la récolte et la logistique.

S'agissant de l'emploi d'engrais agricoles (lisier et fumier), le stockage et l'application conventionnels (c'est-à-dire à ciel ouvert) génèrent des émissions diffuses de méthane et d'oxyde nitreux. Étant donné que le méthane a un potentiel de réchauffement planétaire (PRP) 23 fois plus élevé et que l'oxyde nitreux a un PRP de 265, les émissions de ces deux gaz à effet de serre, même faibles, pèsent significativement sur le bilan des émissions de gaz à effet de serre (GES). **Dans les deux cas, le processus de production de biogaz permet qu'au cours du recyclage des résidus ceux-ci soient conservés, aussi longtemps que possible, dans une cuve étanche au gaz (fermenteur), ce qui assure une réduction considérable des émissions.** En outre, les émissions d'ammoniac peuvent être sensiblement réduites par le stockage et la valorisation du lisier et du fumier dans des équipements étanches au gaz. Un stockage étanche au gaz est donc toujours recommandé. Il permet de réduire les pertes d'azote dans la chaîne de production, de limiter le recours aux engrais minéraux azotés dans le cycle des matières agricoles et de limiter indirectement les émissions.

En 2017, les installations de biogaz ont évité des émissions de GES d'origine non énergétique à hauteur de 1,98 million de tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> en recyclant le lisier et le fumier. Valorisé à un cours boursier de 20 €/t CO<sub>2</sub><sup>6</sup>, cela correspond à une valeur marchande d'environ 40 millions d'euros ; si l'on applique la valeur inférieure des coûts des dommages globaux établie par la Convention méthodologique 3.0 de l'Agence fédérale de l'environnement, soit 180 €/t CO<sub>2</sub>, le gain associé à l'évitement atteint 356 millions d'euros.

Domaine non énergétique	Impact financier
Protection de l'eau	Jusqu'à 25 % de réduction grâce à la culture sur substrat modifié (différences élevées de coûts selon les régions) ; Pour une installation de biogaz de 500 kW, entre 0 et 0,25 ct/kWh
Valorisation des résidus	Recette d'environ 2,9-10,3 €/m <sup>3</sup> de non traités
Lutte contre l'érosion	Ne peut être quantifié directement
Déchets	35 €/t de biodéchets, soit au total 170 millions €/an
Conservation des paysages et espaces verts	Coût du substrat pour l'herbe supérieur à celui de l'ensilage de maïs (respectivement 11,20 cents/ kWh <sub>el</sub> et 9,56 cents/ kWh <sub>el</sub> ) ; investissement nécessaire dans la technologie de transformation (Comité allemand pour la technique et le bâtiment dans l'agriculture (KTBL) 2017)
Espaces de stockage pour le lisier et le fumier	Non pris en compte en raison de nombreuses incertitudes
Récupération du fumier	Installations soumises à la loi EEG : la récupération gratuite couvre les investissements pour le traitement ; Installations post-EEG : dépend des sommes perçues pour l'enlèvement du fumier
Réduction des émissions de GES d'origine non énergétique	2017 : évitement de 1,98 million de tonnes d'équivalent CO <sub>2</sub> , ce qui correspond à 40 millions d'euros à un cours de 20€/t sur le SCEQE ou à 356 millions d'euros si on retient un coût global des sinistres de 180 €/t (valeur inférieure)
Biodiversité	Ne peut être quantifié

**Tableau 2** : Impact des installations de biogaz sur les coûts, hors secteur de l'énergie. Source : note de bas de page 2, tableau 11.

<sup>6</sup> Selon le cours de bourse au moment de la clôture de l'étude. À 25 €/t de CO<sub>2</sub>, la valorisation serait d'environ 50 millions d'euros ; à 30 €/t de CO<sub>2</sub>, elle serait d'environ 60 millions d'euros.



## IV. Scénarios d'évolution du parc d'installations de biogaz en Allemagne à horizon 2035

### IV.1. Facteurs d'évolution, données de base et aperçu des scénarios

Le développement du parc d'installations de biogaz jusqu'en 2035 dépend d'un nombre limité de facteurs, qui déterminent d'une part la construction de nouvelles installations et d'autre part l'éventuelle poursuite de l'exploitation des installations existantes. La mise en service de nouvelles installations a très fortement régressé à la suite des modifications apportées en 2014 et en 2017 à la loi EEG, qui ont considérablement réduit les taux d'achat des nouvelles installations par rapport aux versions précédentes de la loi, et de l'introduction de l'obligation de participation aux appels d'offres pour les installations d'une puissance installée supérieure à 150 kW.

S'agissant des nouvelles installations, les principaux facteurs déterminants sont le niveau des plafonds des montants proposés au cours des appels d'offres dans le cadre de la loi EEG 2017 et, dans le domaine de la valorisation des déchets, les dispositions légales relatives au traitement des déchets organiques se prêtant à la fermentation. Les limites maximales d'adjudication s'établissent déjà à un niveau bas (14,73 ct/kWh en 2018) et sont par ailleurs soumises à une dégression annuelle de 1 %. Si le dispositif actuel est maintenu, seul un nombre limité de nouvelles installations verra le jour dans le cadre du régime de la loi EEG.

Les installations de biogaz existantes présentent elles aussi une dynamique du développement déterminée par les réglementations encadrant les appels d'offres et par les évolutions sur les marchés agricoles. Avec l'expiration de la rémunération prévue par la loi EEG, le nombre total d'installations va très probablement diminuer progressivement au cours des 20 prochaines années si leurs exploitants ne se voient proposer aucune autre perspective économique.

L'évolution des facteurs à horizon 2035 ne pouvant faire l'objet de prévisions précises, la fourchette de scénarios de développement du parc est illustrée ci-dessous à l'aide de trois scénarios présentant les effets économiques. Les données fixes et variables relatives aux installations EEG, établies par l'Agence fédérale des réseaux (BNetzA) et permettant d'estimer le volume actuel d'installations, serviront de données de base pour établir des scénarios d'évolution du nombre d'installations de biogaz et des spécificités régionales. Ces données sont par ailleurs croisées avec un échantillon provenant d'une enquête auprès des exploitants et sont utilisées pour produire des informations sur la gamme des matières premières et une estimation du taux d'utilisation des centrales de cogénération.

En outre, les résultats des appels d'offres publiés par la BNetzA ont été utilisés pour enrichir les données. Dans les chapitres suivants, le scénario intermédiaire d'évolution du parc est utilisé comme une mise à jour interpolée du modèle d'appels d'offres dans le cadre de la loi EEG 2017.

Les données de base des quatre catégories décrites ci-dessus figurent dans le rapport final (tableau 12). Elles ont été paramétrées, s'agissant des installations de référence, essentiellement en fonction de l'enquête menée auprès des exploitants.

Trois scénarios ont ainsi été élaborés, présentant l'évolution du nombre d'installations, leur degré de flexibilité, la capacité totale, ainsi que les quantités d'électricité et de chaleur produites. Le scénario de référence se fonde sur une hypothèse de tendance prudente, qui suppose une mise à l'arrêt de la plupart des installations existantes d'ici 2035 et un léger essor des petites installations de traitement du lisier et des installations de fermentation des déchets. Par ailleurs, il importe d'élaborer un scénario (présenté dans le tableau 3) d'évolution des installations existantes en cas d'épuisement des trajectoires d'appel d'offres, et une variante en cas de maintien de la capacité installée au niveau actuel.



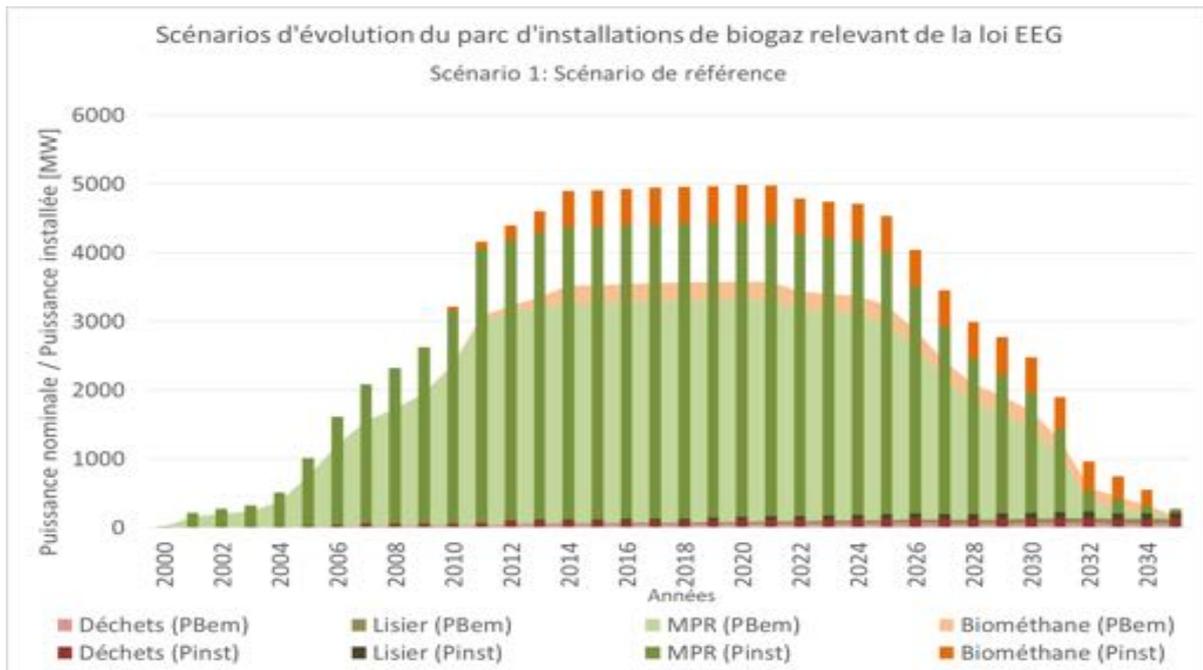
Scénario n°	1	2	3
<b>Description</b>	Scénario de référence	Appels d'offres	Puissance constante
<b>Nouveaux démarrages de petites installations de biogaz traitant le lisier &amp; d'installations de biogaz valorisant les déchets</b>	12 MW par an	12 MW par an	12 MW par an
<b>Parc d'installations</b>	Disparition progressive du parc	Maintien partiel du parc	Maintien de la puissance installée
<b>Dispositifs de flexibilité</b>	Atteinte du plafond légal pour le maintien de la prime de flexibilité pour les installations de biogaz ( <i>Flexdeckel</i> )	Atteinte du plafond légal pour le maintien de la prime de flexibilité pour les installations de biogaz ( <i>Flexdeckel</i> )	Atteinte du plafond légal pour le maintien de la prime de flexibilité pour les installations de biogaz ( <i>Flexdeckel</i> ) & Réduction $P_{nom}$

**Tableau 3** : Synoptique des scénarios d'évolution du parc allemand d'installations de biogaz. Source : note de bas de page 2, tableau 13.

## IV.2. Scénario 1 (scénario de référence) : disparition progressive du parc

Le scénario 1 découle de l'hypothèse d'une cessation d'activité des installations existantes après l'expiration de la période de compensation de 20 ans, et de leur mise à l'arrêt. Le nombre de nouvelles installations est obtenu en extrapolant le nombre moyen de démarrage de petites installations de traitement du lisier et d'installations de fermentation des déchets ces dernières années (soit près de 12 MW au total par an). S'observe alors à partir de 2025, comme le montre la figure 2, une baisse sensible de la puissance installée et de la puissance nominale<sup>7</sup> associée. Le recul du parc apparaît comme la symétrique de son essor entre 2000 et 2014, et s'achève en 2035 avec une faible capacité résiduelle d'installations de biogaz construites entre 2018 et 2035 ou qui existaient déjà comme installations valorisant le lisier et les déchets.

<sup>7</sup> La puissance nominale ( $P_{nom}$ ) est la puissance moyenne sur une période définie (par exemple un an),  $P_{nom} = W_{\text{éi}} / (P_{\text{inst}} \cdot 8760)$ .



**Figure 2 :** Scénario 1 d'évolution du parc allemand d'installations de biogaz (Scénario de référence – disparition progressive du parc) (puissance installée ( $P_{inst}$ ) et puissance nominale ( $P_{Bem}$ )). Source : note de bas de page 2, figure 8.  
<sup>\*</sup>  $P_{Bem}$  (allemand) =  $P_{nom}$  (français)

### IV.3. Scénario 2 : processus d'appel d'offres

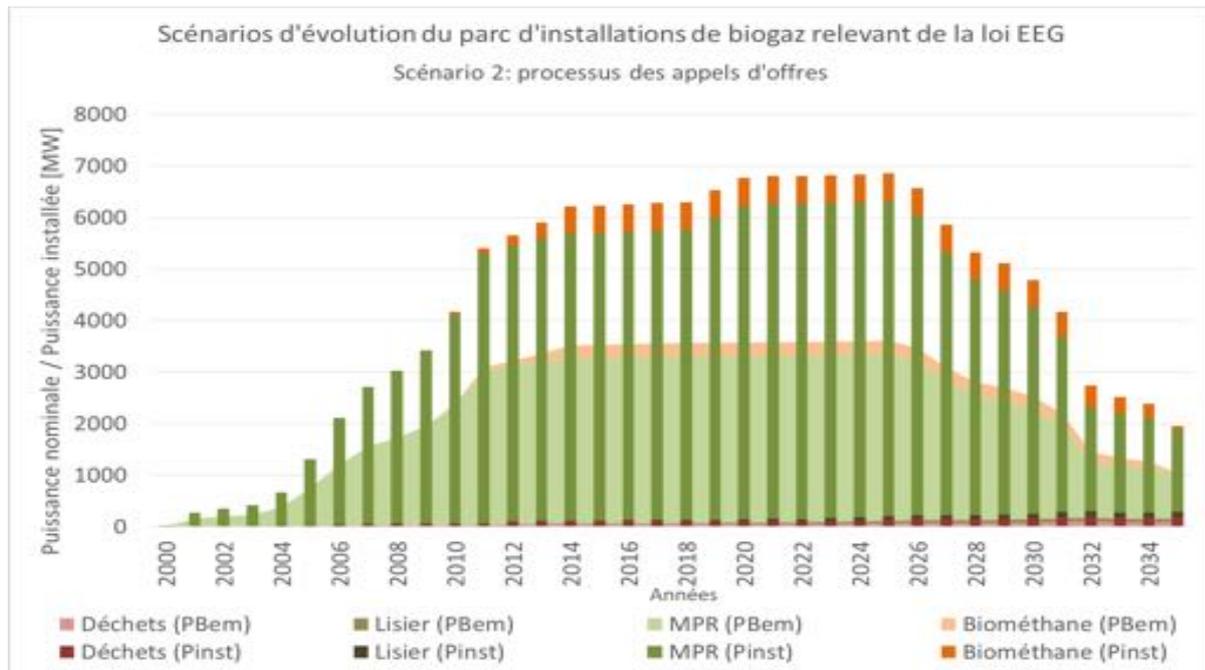
Le second scénario, qui représente l'évolution du parc sous le régime des appels d'offres, repose sur l'hypothèse d'un maintien jusqu'en 2035 de l'élaboration d'appels d'offres tels que prévus par la loi EEG, et en particulier des trajectoires d'appel d'offres (volumes d'augmentation des capacités bruts annuels). L'hypothèse centrale est ici une capacité de 200 MW bruts par an à partir de 2020. 150 MW bruts ont été soumis aux appels d'offre en 2019, comme ce fut le cas en 2017 et 2018. Lors de l'élaboration de l'appel d'offres, il faut tenir compte du fait qu'aux volumes annuels de l'appel d'offres vient s'ajouter la quantité non attribuée au cours de la dernière période d'appel d'offres, et que la somme des capacités des installations mises en service au cours de ladite période en dehors de l'appel d'offres est ensuite déduite de ce volume total. Par ailleurs, l'hypothèse est posée d'une utilisation complète par le parc d'installations, d'ici la mi-2021, de l'actuel volume résiduel (« *Flexdeckel* », plafond flexible) de la capacité installable supplémentaire éligible à une subvention via la prime de flexibilité.<sup>8</sup>

Les volumes d'appels d'offres annuels prévus ne sont par conséquent jamais atteints jusqu'en 2024, et le transfert des capacités restantes de l'appel d'offres à l'année suivante constitue un excédent correspondant dans le volume d'appels d'offres ouvert. À partir de 2025, néanmoins, le volume des années précédentes (à partir de 2004) est nettement supérieur aux volumes des appels d'offres. Le déficit des années précédentes se trouve donc entièrement résorbé dès 2025. Dans les années qui suivent, un nombre important d'installations ne peuvent plus, mathématiquement, obtenir l'adjudication : les volumes appels d'offres sont dès lors sursouscrits. Pour estimer l'attribution des marchés, on a supposé des catégories simplifiées de coûts en fonction des types d'installations, catégories qui définissent la compétitivité - et donc la place remportée dans l'attribution - dans les appels d'offres sursouscrits à partir de 2025. La place remportée dans l'attribution y est hiérarchisée comme suit : centrales de cogénération au bois,

<sup>8</sup> Au cours de la période d'élaboration du rapport, le législateur a entrepris de modifier la réglementation relative au *Flexdeckel* dans le Code de l'énergie (*Energiesammelgesetz*). Les calculs du projet étant déjà achevés au moment de la modification du Code pré-cité et celle-ci ayant des effets relativement complexes, il n'a pas été tenu compte du Code de l'énergie dans cette étude.

installations de biogaz valorisant les déchets, installations de biogaz à partir de matières premières recyclables, centrales de cogénération à partir de biométhane. Par ailleurs, l'estimation est basée sur l'hypothèse d'une participation au processus d'appel d'offres un an avant l'expiration de la rémunération prévue par la loi EEG, soit l'hypothèse d'une transition sans heurts vers le modèle d'appel d'offres. Les participations anticipées aux appels d'offres et le passage au modèle d'appel d'offres pour des raisons stratégiques n'ont pas pu être pris en compte.

S'ensuit un recul du parc, résultat similaire à celui du scénario 1 à cette différence près que les appels d'offres en 2035 maintiennent environ 2 000 MW de capacité installée et un peu moins de 1 000 MW de capacité nominale.



**Figure 3 :** Scénario 2 -- Estimation de l'évolution du parc allemand des installations de biogaz en cas de maintien du processus d'appel d'offres. Source : note de bas de page 2, figure 10.

\*  $P_{Bem}$  (allemand) =  $P_{nom}$  (français)

#### IV.4. Scénario 3 : maintien du parc

Le troisième scénario représente un maintien du parc avec la conservation de la puissance installée actuelle. Au contraire du modèle de l'appel d'offres, l'hypothèse faite ici est celle d'une poursuite illimitée de l'exploitation des installations<sup>9</sup> après la fin des subventions prévues par la loi EEG, ou de leur remplacement à volume constant par de nouvelles installations lorsqu'elles seront mises hors service. L'objectif principal de ce scénario est de représenter la fourchette haute de l'évolution théoriquement possible du parc d'installations. En pratique, le cadre juridique et économique actuel ne semble guère propice à sa réalisation. Dans ce scénario, la puissance installée totale constitue donc la limite supérieure ; dans le cadre de la flexibilisation des installations de biogaz valorisant des matières premières de recyclage, l'écart nécessaire entre la puissance installée et la puissance nominale une fois le *Flexdeckel* (plafond flexible) initial atteint est obtenu en réduisant la puissance nominale pour une partie du parc. La figure 4 représente l'évolution correspondante du parc d'installations.

<sup>9</sup> À l'exclusion des centrales de cogénération à partir de biométhane.

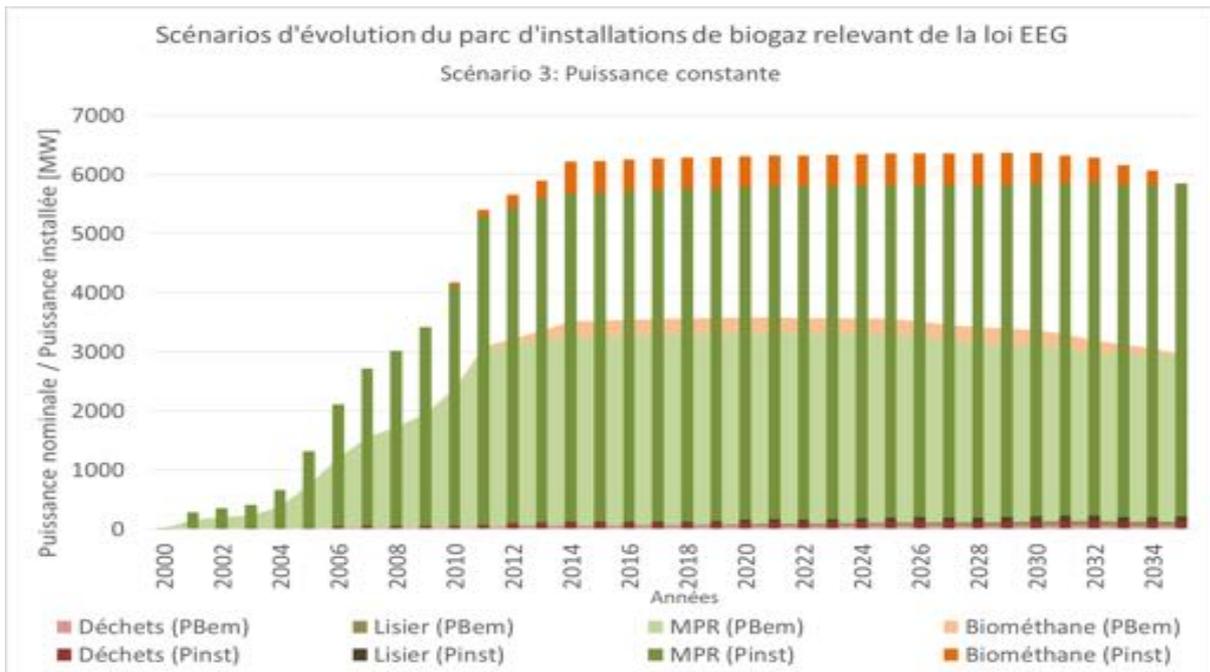


Figure 4 : Scénario 3 : Maintien de la puissance installée du parc allemand des installations de biogaz. Source : note de bas de page 2, figure 11.

\*  $P_{Bem}$  (allemand) =  $P_{nom}$  (français)

## IV.5. Importance de la bioénergie pour le système des énergies renouvelables : compensation nécessaire jusqu'en 2035 de l'électricité et de la chaleur renouvelables ainsi que de la flexibilité, selon le scénario de référence

Si l'un des scénarios de recul du parc décrits ci-dessus et actuellement vraisemblables (scénarios 1 et 2) se réalise, s'ensuivra un déficit par rapport à la trajectoire de développement prévue pour les énergies renouvelables dans le secteur de l'électricité et de la chaleur en Allemagne, et un recul de la production contrôlable. Afin de ne pas compromettre les objectifs de l'Allemagne en matière de développement des énergies renouvelables, ni plus généralement les objectifs liés à la préservation de l'environnement, il sera nécessaire de fournir autrement ces quantités d'énergie.<sup>10</sup> La fermeture d'installations de bioénergie devrait alors être compensée par la construction de nouvelles installations d'énergie renouvelable produisant de l'électricité et de la chaleur, pour que le niveau défini dans la trajectoire de développement puisse être maintenu. Dans le secteur de l'électricité, il faut par ailleurs tenir compte du fait que les installations de biogaz, en sus de leur production d'électricité, présentent l'avantage d'être utilisables comme une option de flexibilité, et que tout nouveau modèle de production d'électricité devrait donc également assurer cette fonctionnalité. À titre d'exemple, le rattrapage, par la mise en place d'autres options renouvelables, du déficit en matière d'électricité, de chaleur et de capacité de stockage que le scénario 1 (disparition progressive du parc) générerait jusqu'en 2035 a été calculé approximativement. À cette fin, ont été appliquées les hypothèses suivantes pour le remplacement des contributions manquantes :

<sup>10</sup> Théoriquement, de plus fortes économies d'énergie pourraient également entraîner une hausse de la proportion des énergies renouvelables quand bien même la proportion de la bioénergie diminuerait. Il faudrait pour cela une diminution de la demande totale d'électricité et de chaleur telle - au-delà des objectifs fixés au niveau politique - qu'elle compenserait les quantités d'énergie manquantes.



- Électricité : 50 % d'énergie éolienne à terre et 50 % d'énergie photovoltaïque (par rapport à  $W_{el}$ )
- Chaleur : Pompes à chaleur à haute température, coefficient de performance annuel = 2,5
- Option de flexibilité : stockage sur batterie avec C-rate<sup>11</sup> = 1/8

Il en ressort, comme le montre le tableau 4, qu'il faudrait assurer une production cumulée d'au moins 6,1 GW via des éoliennes terrestres et 19,7 GW via le photovoltaïque d'ici 2035, en sus des volumes d'expansion déjà requis. La double colonne «  $P_{el}$  cumulée éolien/PV » indique la montée en charge totale nécessaire pour l'éolien et le photovoltaïque d'ici 2035. Ces chiffres peuvent servir de référence pour établir des comparaisons entre les ordres de grandeur estimés et la puissance actuelle du parc d'installations d'éoliennes à terre (50,5 GW) et du photovoltaïque (42,4 GW). La double colonne « Capacité supplémentaire éolienne/ photovoltaïque » indique la capacité supplémentaire requise pour l'éolien et le photovoltaïque sur une base annuelle.

Scénario 1	Quantités d'électricité et de chaleur à compenser				Distribution énergie PV / éolienne : 50 % / 50 %			
					$P_{el}$ cumulée éolien / PV		Capacité supplémentaire éolienne / PV	
	Année [a]	Electricité [TWh]	Chaleur [TWh]	Electricité pompe à chaleur [TWh]	Total électricité [TWh]	Eolien [GW]	PV [GW]	Eolien [MW]
2020	0,0	0,0	0	0,0	0	0	0	0
2021	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6	20
2022	1,3	0,6	0,2	1,5	0,3	0,8	250	805
2023	1,6	0,7	0,3	1,9	0,3	1,0	65	209
2024	1,8	0,8	0,3	2,1	0,4	1,2	46	148
2025	3,0	1,4	0,5	3,6	0,6	2,0	241	777
2026	6,2	2,8	1,1	7,3	1,3	4,0	646	2079
2027	10,1	4,5	1,8	11,9	2,0	6,6	784	2526
2028	13,1	5,8	2,3	15,5	2,6	8,5	604	1944
2029	14,6	6,5	2,6	17,2	2,9	9,5	297	955
2030	16,5	7,4	3,0	19,5	3,3	10,7	389	1253
2031	20,2	9,2	3,7	23,9	4,1	13,1	752	2423
2032	26,3	12,0	4,8	31,1	5,3	17,1	1233	3970
2033	27,4	12,8	5,1	32,5	5,6	17,9	249	803
2034	28,5	13,5	5,4	33,9	5,8	18,7	235	756
2035	29,9	14,8	5,9	35,8	6,1	19,7	321	1034
<b>Volume moyen de nouvelles installations [MW/a] (2020 - 2035)</b>							<b>382</b>	<b>1231</b>

**Tableau 4 :** Aperçu de la compensation estimée du déficit de production d'électricité et de chaleur dans le scénario 1 (pour l'énergie éolienne, l'estimation ne concerne que les éoliennes à terre). Source : note de bas de page 2, tableau 14.

Outre la fin de leurs contributions électriques et thermiques, l'arrêt des installations de biogaz susciterait également la perte de la flexibilité qu'elles offrent. Aussi a-t-on procédé à une estimation simplifiée, reposant sur l'hypothèse d'un remplacement, par le stockage (sur batterie), des installations valorisant les matières premières recyclables et des centrales de cogénération à partir de biométhane, à capacité constante. Afin d'assurer une comparabilité directe (c'est-à-dire de simuler la capacité de stockage sur batteries des productions du parc actuel d'installations de biogaz), on suppose un rapport entre la puissance de l'onduleur et la capacité installée des batteries (C-rate) de 1/8, correspondant à une production d'électricité quotidienne basée sur la demande (avec un triplement de l'installation de biogaz) de 8 h.

Les résultats de cette analyse montrent plus clairement encore l'ampleur de l'essor d'autres technologies que requerrait la disparition progressive du parc d'installations de biogaz établie dans le scénario 1. Comme le montre le tableau 5, cette disparition générerait une demande supplémentaire de puissance de stockage de 4,8 GW et d'environ 38 GWh

<sup>11</sup> Le C-rate qualifie le processus de charge et de décharge des batteries, un C-rate de 1 correspondant à un processus complet de charge ou de décharge en une heure. Un C-rate de 0,5, par exemple, indique que le processus de charge ou de décharge s'achève dans les 2 heures si le courant est maintenu à puissance modérée.



de capacité de stockage. Bien que le C-rate actuel des installations actuelles de stockage par batteries s'établisse à 0,45, une capacité de stockage plus élevée a été retenue ici. Les installations de stockage devraient également couvrir les besoins de transfert à moyen terme (pics d'électricité ou déficits de fourniture) pour pouvoir être considérées comme des substituts équivalents aux installations de biogaz. À ce jour, les batteries installées ont une capacité de stockage plus élevée mais une durée de stockage plus courte (d'environ deux heures). Étant donné les taux de croissance élevés du marché du stockage par batteries dans les différents segments, la réalisation des volumes d'installation indiqués semble techniquement possible.

Scénario 1	Puissance contrôlable à compenser			Installations actuelles de stockages		Installations supplémentaires de stockages		
	Année [a]	Installations de Biogaz valorisant les MPR	Centrales de cogénération à partir de biométhane	Total	Puissance	Capacité	Puissance	Capacité
		[GW]	[GW]	[GW]	[GW]	[GWh]	[MW]	[MWh]
2020	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	
2021	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	14	110	
2022	0,2	0,0	0,2	0,2	1,6	189	1508	
2023	0,3	0,0	0,3	0,3	2,1	58	462	
2024	0,3	0,0	0,3	0,3	2,4	44	352	
2025	0,5	0,0	0,5	0,5	3,9	188	1502	
2026	1,0	0,0	1,0	1,0	7,9	494	3954	
2027	1,6	0,0	1,6	1,6	12,6	591	4724	
2028	2,0	0,0	2,0	2,0	16,3	455	3640	
2029	2,3	0,0	2,3	2,3	18,1	230	1844	
2030	2,6	0,0	2,6	2,6	20,5	304	2435	
2031	3,1	0,1	3,2	3,2	25,2	586	4689	
2032	4,0	0,1	4,1	4,1	32,8	946	7566	
2033	4,1	0,2	4,3	4,3	34,3	189	1511	
2034	4,2	0,3	4,5	4,5	35,9	194	1556	
2035	4,2	0,5	4,8	4,8	38,2	295	2360	
<b>Volume moyen de nouvelles installations [MW/a] (2020 - 2035)</b>						<b>299</b>	<b>2388</b>	

**Tableau 5** : Estimation des capacités de stockage supplémentaires nécessaires pour compenser la perte de la flexibilité qu'offre la bioénergie. Source : note de bas de page 2, tableau 15.

Pour comparer les ordres de grandeur, il convient de se référer au parc actuel de centrales électriques à pompage-turbinage et d'installations fixes de stockage sur batteries. L'Allemagne dispose, fin 2018, de centrales de pompage-turbinage d'une puissance installée de 6,4 GW et d'une capacité de stockage de 39 GWhs. Le domaine des installations de stockage sur batteries stationnaires est marqué depuis plusieurs années par un développement très dynamique : en 2018, il représente déjà 0,7 GW de capacité installée (dont 323 MW dans le cadre de grands projets de stockage et 385 MW dans des applications de stockage domestique décentralisé), avec une capacité d'environ 1,6 GWh, soit un C-rate pondéré en fonction du volume de 0,45.

Reste par ailleurs à étudier la question de savoir si la fourniture de flexibilité via le stockage sur batterie est plus ou moins avantageuse économiquement que l'exploitation d'installations de bioénergie permettant une utilisation flexible.

## V. Synthèse et conclusions

Le biogaz fournit de nombreux services au-delà du secteur de l'électricité. Or le modèle de financement des installations de biogaz dans le cadre de la loi EEG – et, par ailleurs, le débat public – sont dictés par la politique énergétique. On oublie souvent quels services le biogaz assure dans d'autres domaines, ou pourrait y assurer davantage moyennant la mise en place d'un cadre réglementaire approprié. Il s'agit notamment des processus naturels et des activités agricoles liés au sol, à l'utilisation des terres, à la valorisation et à l'élimination ; ou encore de la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine non-énergétique par la valorisation des excréments d'animaux. D'une part, l'agriculture assure une bonne partie des ressources en matières premières pour les installations de biogaz (avec toutes les répercussions associées sur l'utilisation des terres). D'autre part, les installations de biogaz servent à valoriser les résidus agricoles qui devraient, sinon, être stockés et éliminés autrement (générant notamment des émissions indirectes de GES).

En dépit des services qu'elles fournissent dans d'autres domaines, le financement via la loi EEG signifie que la rentabilité des installations de biogaz dépend essentiellement – outre des stratégies de commercialisation de la chaleur, de distribution directe et de flexibilisation – de la maximalisation de la quantité d'électricité produite. **Cela signifie que les consommateurs d'électricité cofinancent par leurs factures d'électricité les services que les installations de biogaz fournissent aux autres secteurs.** Aussi la présente étude entreprend-elle une première description des services assurés dans les domaines d'activité mentionnés, les quantifiant au cas par cas autant que possible.

Ont été exposés, en outre, des scénarios d'évolution du parc allemand d'installations de biogaz jusqu'en 2035, et leurs conséquences pour le système énergétique. Il en ressort que si les réglementations actuelles sont maintenues, il faut s'attendre à une réduction importante de la capacité. Cette évolution aboutit par ailleurs à un conflit avec les objectifs fixés dans le cadre de la transition énergétique (objectifs de développement des EnR et de réduction des émissions de GES), dans la mesure où cette réduction de capacité oblige à remplacer par d'autres énergies renouvelables les quantités d'électricité et de chaleur ainsi que les services contrôlables ainsi perdus.

Aussi les auteurs estiment-ils nécessaire la mise en place d'un cadre économique et réglementaire qui assure des conditions équitables et reflète de manière adéquate le rapport coût-bénéfice du biogaz par rapport aux autres technologies renouvelables, tout en permettant de mieux tirer parti à l'avenir des atouts du biogaz au-delà du secteur de l'électricité et en respectant les objectifs environnementaux. Le biogaz, comme forme contrôlable de production d'énergie susceptible d'être utilisée simultanément pour l'électricité, la chaleur, le transport et toutes sortes d'activités, joue un rôle clé dans la politique énergétique mais aussi dans la politique agricole et la politique de protection de la nature. Avec la mise en œuvre des accords de Paris, le biogaz va encore gagner en importance, devenant une source d'énergie de plus en plus rare, soumise à une concurrence accrue pour l'utilisation la plus rentable. Ne serait-ce que dans cette perspective, il semble important de continuer à exploiter le potentiel du biogaz tant dans le système d'approvisionnement en énergie que dans d'autres domaines. Mettre davantage en valeur les atouts du biogaz au-delà du secteur de l'électricité pourrait constituer un point de départ pour développer cette approche.