

Potentiel énergétique du digestat produit par digestion anaérobie dans les centrales de biogaz : le cas de la Croatie

Résumé

Le nombre de centrales à biogaz a considérablement augmenté ces dernières années. De nombreux pays ont développé des marchés nationaux du biogaz compétitifs après des décennies de recherche intensive et d'innovation technologique.

Ces centrales utilisent des procédés de digestion anaérobie avancés pour accroître la production de biogaz, principale source de revenus.

Cependant, le digestat est encore considéré comme un sous-produit et généralement éliminé en décharge.

Cet article propose la production d'énergie à partir du digestat comme une alternative économiquement viable.

Avant cette production, le digestat est séparé en fractions solide et liquide, puis séché par voie thermique.

Des mesures calorimétriques ont montré que son pouvoir calorifique est de 13 MJ/kg, ce qui favorise son potentiel de production d'énergie, notamment si la chaleur excédentaire issue de la cogénération est utilisée pour le séchage.

Le digestat produit dans les centrales à biogaz peut être utilisé comme combustible alternatif et économique pour la production d'électricité dans les centrales biomasse.

On estime que l'électricité produite à partir de digestat pourrait représenter 4,2 % de la production totale d'électricité en Croatie.

L'analyse économique a révélé que le prix de l'électricité produite à partir de digestat, dans le cadre du système actuel de tarifs d'achat garantis en Croatie, est deux à trois fois supérieur au coût total du digestat.

Introduction

Ces dernières années, le secteur du biogaz a connu une forte expansion, tant en termes de capacité installée totale que de nombre d'installations.

De nombreux pays ont développé des technologies modernes de production de biogaz, ainsi que des marchés nationaux compétitifs, après des décennies de recherche et de développement technologique intensifs.

Aujourd'hui, l'énergie produite par les centrales au biogaz contribue à la réalisation des objectifs à long terme en matière de sécurité d'approvisionnement énergétique et d'atténuation du changement climatique.

Le marché européen du biogaz comprend des milliers d'installations.

Fin 2014, l'UE-28 comptait 17 240 installations de cogénération à partir de biogaz, pour une capacité électrique installée totale de 8 339 MW, soit une hausse de 20 % par rapport à l'année précédente (Association européenne du biogaz, [2016](#)).

Ces installations ont produit 63 TWh d'électricité, soit l'équivalent de la consommation de 15 millions de foyers (Association européenne du biogaz, [2016](#)).

La plupart des installations de biogaz sont axées sur la production d'électricité.

En revanche, la chaleur produite n'est que partiellement utilisée (Rutz *et al.*, [2012](#)).

En effet, l'énergie thermique a des applications commerciales limitées, un coût inférieur et est considérée comme de moindre qualité que l'électricité.

Cette inefficacité constitue un inconvénient majeur de l'industrie moderne du biogaz, engendrant des pertes microéconomiques et macroéconomiques, ainsi que des difficultés liées à la concurrence croissante pour l'utilisation des terres.

Le biogaz est produit par digestion anaérobie (DA), un processus biochimique au cours duquel différents types de micro-organismes anaérobies (bactéries acidogènes, bactéries acétogènes et archées méthanogènes) dégradent la matière organique complexe (biomasse) en composés organiques plus simples, en milieu pauvre en oxygène.

Ce même processus se déroule dans les installations de biogaz où la matière organique entrante, appelée matière première ou substrat (Vindiš *et al.*, [2010](#)), est digérée anaérobiquement en deux produits principaux : le biogaz et le digestat.

Généralement, la DA est axée sur la production de biogaz comme produit principal, le digestat étant considéré comme un sous-produit, ce qui engendre des coûts supplémentaires pour les installations de biogaz.

Le digestat peut être utilisé de différentes manières.

Actuellement, il est employé comme engrais, ce qui constitue la méthode d'élimination la plus simple, d'autant plus qu'il est riche en macronutriments (azote, phosphore et potassium) et en micronutriments (par exemple, sélénium et cuivre) (Saedi *et al.*, [2008](#)).

Le digestat contient des proportions importantes d'eau et de carbone dans la matière organique non digérée, soit entre 3 % et 5 % du volume total. Chaque composant du digestat bénéficie d'un marché spécifique.

Néanmoins, bien que considéré comme un engrais de grande valeur, le digestat présente un rapport nutriments instable et des coûts d'application et de stockage élevés. Sa composition chimique spécifique et son effet positif limité à certaines espèces agricoles rendent son élimination de plus en plus problématique.

En tant qu'engrais, le digestat doit être conforme à la *directive Nitrates*.

Cette *directive*, communément appelée directive 91/676/CEE du Conseil du 12 décembre 1991, concerne la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole (Communauté économique européenne, [1991](#)).

Le développement de nouvelles applications du digestat, notamment dans des installations de biogaz modernisées, permettrait d'éviter un enfouissement excessif de ce dernier.

Plusieurs études ont exploré les utilisations alternatives possibles du digestat, outre la fertilisation des sols. Kratzeisen *et al.* ([2010](#)) ont étudié les propriétés de combustion du digestat séché pour la production d'énergie et ont constaté que son pouvoir calorifique se situe entre 15 et 16 MJ/kg, ce qui est comparable à celui du bois.

Monlau *et al.* ([2015](#)) ont conclu que la chaleur excédentaire des installations de biogaz pourrait répondre aux besoins du séchage du digestat et que le couplage de la pyrolyse du digestat aux résultats de la digestion anaérobie permettrait d'obtenir 42 % d'électricité en plus par rapport à la digestion anaérobie autonome.

Hossain *et al.* ([2016](#)) ont testé les performances d'un moteur diesel multicylindres fonctionnant avec des mélanges d'huile de pyrolyse de digestat.

Ils ont constaté que ces mélanges s'enflamment plus tard et brûlent plus rapidement que le diesel fossile.

Pour un mélange contenant jusqu'à 30 % d'huile de pyrolyse, le rendement thermique du moteur a diminué de 7 % et la consommation de carburant a augmenté de 32 %, tandis que les émissions de CO₂ ont diminué de 66 % par rapport au diesel fossile.

Neumann *et al.* ([2016](#)) ont utilisé un nouveau procédé de reformage thermocatalytique pour la conversion du digestat avec un pouvoir calorifique de 14 MJ/kg en bio-huile de haute qualité avec une faible acidité et un pouvoir calorifique de 35 MJ/kg.

Pedrazzi *et al.* ([2015](#)) ont étudié l'utilisation du digestat comme biocombustible dans les chaudières domestiques.

Ils ont constaté que les chaudières brûlant un mélange de digestat et de granulés de bois, d'un pouvoir calorifique de 16,5 MJ/kg, atteignent un rendement de 46 %, tandis que celles brûlant des granulés de bois pur, d'un pouvoir calorifique de 19 MJ/kg, atteignent un rendement de 55 %.

Cette recherche démontrera que le digestat présente un fort potentiel en tant que combustible alternatif pour la production d'énergie.

Son pouvoir calorifique sera déterminé expérimentalement par des mesures calorimétriques et le potentiel du digestat en Croatie sera calculé.

Biogaz en Croatie

La production et l'utilisation du biogaz en Croatie constituent l'un des secteurs les moins développés, mais récemment devenu très dynamique, dans le domaine des énergies renouvelables.

Bien que les énergies renouvelables soient mentionnées dans la loi sur l'énergie, le véritable tournant pour les projets d'énergies renouvelables a eu lieu en 2007, avec l'adoption de règlements encadrant la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables et d'un système tarifaire pour les producteurs d'électricité renouvelable.

Le tarif d'achat garanti (FiT) croate détermine l'éligibilité du producteur, le niveau et la durée de la subvention pour la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables et de cogénération. Les niveaux tarifaires définis par le système FiT dépendent du type de source d'énergie renouvelable, de la capacité installée et de la quantité d'électricité injectée sur le réseau. L'objectif est de garantir un statut privilégié et un retour sur investissement raisonnable aux producteurs d'électricité à partir d'énergies renouvelables sur le marché national de l'électricité.

Jusqu'à mi-2009, la Croatie ne comptait que trois installations de biogaz, dont une seule utilisait des matières premières agricoles pour produire de l'électricité renouvelable.

La centrale de biogaz d'Ivankovo est une unité de cogénération produisant du biogaz à partir de fumier et d'ensilage de maïs.

D'une puissance installée de 1 MW, elle génère 8 GWh d'électricité par an, l'énergie thermique ainsi produite étant utilisée pour le séchage des matières premières (Saedi *et al.*, [2008](#)).

Outre la centrale de biogaz d'Ivankovo, les deux autres producteurs de biogaz sont la station d'épuration de Zagreb et la centrale de valorisation énergétique des déchets de la décharge de Jakuševac.

La station d'épuration de Zagreb produit de l'électricité et de la chaleur à partir des boues d'épuration. Sa puissance installée est de 2,5 MW et sa production annuelle d'électricité s'élève à 13,2 GWh.

Le pouvoir calorifique inférieur du biogaz est de 24 MJ/m³. L'électricité et la chaleur sont fournies à la station d'épuration, tandis que le surplus d'électricité est injecté dans le réseau électrique national.

La centrale de Jakuševac utilise le gaz de décharge issu des déchets municipaux. Ce gaz, composé principalement de méthane et de dioxyde de carbone, possède un pouvoir calorifique inférieur de 18 MJ/m³. La centrale a une puissance installée de 3 MW et une production annuelle d'électricité de 15 GWh.

Actuellement, en Croatie, la capacité électrique totale installée est de 35,7 MW dans 22 centrales au biogaz et la production annuelle d'électricité est de 237,3 GWh (Ministère de l'Environnement et de l'Énergie, République de Croatie, [2016](#)).

Grâce aux données disponibles pour la Croatie, il est possible d'estimer la quantité totale de digestat produite par les centrales au biogaz et l'énergie qui pourrait en être extraite dans les centrales à biomasse voisines.

Ainsi, le digestat serait valorisé de manière appropriée, au lieu d'être enfoui dans des décharges où il représente un danger potentiel pour l'environnement. Le digestat peut donc être considéré comme une source de revenus supplémentaire pour les centrales au biogaz et à biomasse, tout en contribuant à améliorer l'image de la Croatie en matière d'énergies renouvelables.

Aujourd'hui, en Croatie, la production de biogaz est liée à la biomasse agricole.

Cependant, l'utilisation de cette biomasse comme matière première dans les centrales à biogaz est limitée par la production agricole actuelle, la saisonnalité et les coûts de transport entre le lieu de production et la centrale.

Ce sont les principales raisons des capacités installées plus faibles des centrales à biogaz par rapport à celles des centrales à biomasse (incluant les déchets et les eaux usées).

La production de biogaz à partir de matières premières agricoles, telles que les résidus de récolte, le fumier et divers déchets organiques, présente de nombreux avantages : c'est une source d'énergie renouvelable, elle contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et de méthane (CH₄) dans l'atmosphère, diminue le volume des déchets organiques et prolonge la durée de vie des décharges, et prévient la pollution des sols et de l'eau.

Les bénéfices de l'utilisation du biogaz se répercutent sur plusieurs secteurs de l'économie. Par conséquent, sa production et son utilisation sont encadrées par diverses réglementations, ce qui, comparativement à d'autres énergies renouvelables, complexifie la mise en œuvre des projets de biogaz, notamment parce que les matières premières utilisées sont des déchets agricoles et animaux.

Ce problème est encore plus marqué pour le digestat, car celui-ci n'est pas encore considéré comme une nouvelle matière première, mais plutôt comme un déchet généré par les installations de biogaz.

Cependant, en raison de la réglementation stricte de l'UE, la mise en décharge ou l'épandage du digestat sur les terres agricoles seront bientôt interdits.

De ce fait, il est nécessaire de trouver des utilisations nouvelles et innovantes pour le digestat produit dans les installations de biogaz.

Matériels et méthodes

Composition et préparation du digestat

Le digestat observé est obtenu par digestion anaérobiose mésophile (à 38 °C pendant 42 jours) de lisier de porc et d'ensilage de maïs. Le rapport lisier de porc/ensilage de maïs est de 30/70.

Après séparation des fractions solide et liquide du digestat, les échantillons de digestat solide séché sont soigneusement préparés pour l'analyse calorimétrique. Le digestat est séché à l'étuve pendant 3 heures à 130 °C.

La pesée des échantillons de digestat avant et après séchage révèle une teneur en eau pouvant atteindre 80 %, ce qui indique que le digestat brut est impropre à la combustion. La composition chimique de la fraction solide du digestat est présentée dans [le tableau 1](#).

Tableau 1. Composition chimique de la fraction solide du digestat

Élément	fraction solide	Élément	fraction solide	Élément	fraction solide
matière sèche	20,50%	K ₂ O	13,60 kg/t	B	19,80 g/t
N total	29,70 kg/t	Mg	7,91 kg/t	Cu	23,50 g/t
NH ₄ -N	5,75 kg/t	MgO	13,10 kg/t	Co	0,67 g/t
P	8,59 kg/t	Californie	17,30 kg/t	Mn	134,00 g/t
P2O5	19,70 kg/t	CaO	24,20 kg/t	Zn	87,20 g/t
K	11,30 kg/t	S	3,53 kg/t		

Malheureusement, aucun équipement de laboratoire adapté n'était disponible pour l'analyse de la composition de la fraction liquide.

Cette fraction est généralement utilisée pour la fertirrigation en raison de sa richesse en nutriments.

Néanmoins, cette étude se concentrera sur la fraction solide, source potentielle d'énergie du digestat.

Les granulés de combustible à base de digestat sont obtenus par compression mécanique de digestat séché.

Chaque granulé correspond à une mesure calorimétrique. Les granulés sont fixés à l'intérieur de la bombe calorimétrique par des fils de nickel reliés aux électrodes de mise à feu. La bombe calorimétrique est ensuite fermée, purgée et mise sous pression d'oxygène pur à 30 bars. Elle est immergée dans l'eau contenue dans un récipient en laiton.

Ce récipient est équipé d'un agitateur pour accélérer l'établissement du régime permanent et d'une sonde de température immergée pour la mesure de la température de l'eau.

La procédure calorimétrique

La calorimétrie est la méthode expérimentale de mesure du pouvoir calorifique des combustibles.

L'énergie thermique libérée lors de la combustion de pastilles de combustible est transférée à l'eau et à la bombe calorimétriques, dont l'élévation de température est mesurée. Le pouvoir calorifique de l'échantillon de combustible est déterminé en mesurant cette élévation de température, ainsi que la masse de l'échantillon.

La capacité thermique massique de l'eau, le volume d'eau calorimétrique et la capacité thermique de la bombe calorimétrique sont des valeurs connues, fournies par le fabricant de l'appareil.

L'échantillon de combustible est enflammé par un courant électrique véhiculé par des fils de nickel reliés à des électrodes d'allumage. La faible chaleur dégagée par la combustion des fils de nickel est soustraite du bilan thermique calorimétrique.

Les relevés de température de l'eau sont effectués à différents intervalles de temps en fonction de la phase de la mesure calorimétrique :

- (1) avant l'allumage, les relevés de température sont effectués toutes les 60 s ;
- (2) immédiatement après l'allumage, les relevés de température sont effectués toutes les 15 s ; et
- (3) après la brusque augmentation initiale de la température, les relevés de température sont effectués toutes les 60 s jusqu'à ce que l'état stable soit atteint.

L'équation du bilan thermique de la calorimétrie établit une équivalence entre la chaleur générée par la combustion de l'échantillon de combustible et des fils de nickel (côté gauche) et la chaleur absorbée par l'eau calorimétrique et la bombe (côté droit).

$$\begin{aligned} M_{\text{g}} H_{\text{g}} + Q_{\text{h}} &= \left(W_{\text{w}} + W_{\text{b}} \right) \Delta T \end{aligned}$$

En réarrangeant le bilan thermique de la bombe calorimétrique (1), le pouvoir calorifique supérieur du combustible peut être déterminé comme suit :

$$H_{\text{g}} = \frac{\left(W_{\text{w}} + W_{\text{b}} \right) \Delta T - Q_{\text{h}}}{M_{\text{g}}} \quad (2)$$

Dans les équations précédentes, H_{g} (kJ/kg) représente le pouvoir calorifique supérieur du combustible, M_{g} (kg) la masse de l'échantillon de combustible, W_{w} (kJ/K) la capacité thermique de l'eau calorimétrique, W_{b} (kJ/K) la capacité thermique de la bombe calorimétrique, ΔT (K) l'élévation totale de température de l'eau calorimétrique et de la bombe avant l'inflammation et après l'établissement du régime permanent, et Q_{h} (kJ) la chaleur dégagée par la combustion des fils de nickel.

La capacité thermique de l'eau calorimétrique est de...

$$W_{\text{w}} = M_{\text{w}} c \quad (3)$$

Dans l'équation ci-dessus, M_{w} (kg) représente la masse d'eau calorimétrique et c (kJ/[kg·K]) sa capacité thermique massique.

À la température moyenne de 20 °C lors des mesures calorimétriques, l'eau possède une capacité thermique massique de 4,182 kJ/(kg·K) et une masse volumique de 998,2 kg/m³ (Christen et al. , [2010](#)).

La capacité thermique de la bombe et du récipient calorimétriques est donnée par le fabricant : $W_{\text{b}} = 1868,3$ kJ/K. Le bilan thermique calorimétrique doit être corrigé de la chaleur dégagée par la combustion des fils de nickel, calculée à partir de l'équation suivante :

$$Q_{\text{h}} = M_{\text{z}} H_{\text{z}} \quad (4)$$

Dans l'équation précédente, M_{z} (kg) représente la masse du fil de nickel brûlé et H_{z} (kJ/kg) le pouvoir calorifique du nickel, défini comme étant de 6 698 kJ/kg. La masse du fil de nickel brûlé est déterminée à partir de l'équation suivante :

$$M_{\text{z}} = M_{\text{o}} (l_{\text{bur}} - l_{\text{rem}}) \quad (5)$$

Dans l'équation (5), M_{o} (kg/m) est la masse linéaire du fil de nickel définie comme 8×10^{-5} kg/m et l_{bur} (m) est la longueur du fil brûlé, calculée comme la différence entre la longueur initiale du fil de nickel l_{z} (m) et la longueur des fils de nickel non brûlés après combustion l_{rem} (m).

Résultats et discussion

Pouvoir calorifique du digestat

Dix mesures calorimétriques ont été réalisées afin de déterminer le pouvoir calorifique du digestat. Les résultats expérimentaux sont présentés dans [le tableau 2](#). On constate que le pouvoir calorifique du digestat sec se situe entre 12,5 et 13,5 MJ/kg, avec une valeur moyenne de 13 MJ/kg. Ce pouvoir calorifique dépend de la composition de la matière première.

Cependant, comme indiqué précédemment, le type de digestat utilisé dans ces expériences est spécifique aux installations de biogaz croates, car elles utilisent toutes une matière première similaire : un mélange d'ensilage de maïs et de lisier de porc.

Tableau 2. Pouvoir calorifique supérieur du digestat obtenu par calorimétrie

Non.	Masse des granulés (g)	Pouvoir calorifique (MJ/kg)	Masse des cendres résiduelles (g)	Teneur en cendres mesurée (%)
1.	0,3483	12,568	0,027	7,752
2.	0,5656	13,254	0,052	9,194
3.	0,5110	12,884	0,057	11,155
4.	0,4390	12,825	0,033	7,517
5.	0,4751	13,068	0,036	7,577
6.	0,3860	12,981	0,034	8,808
7.	0,4139	13,049	0,028	6,765
8.	0,3980	13,354	0,040	10,050
9.	0,4418	13,326	0,057	12,902
10.	0,5075	13,345	0,042	8,276
valeur calorifique moyenne		13,065 ± 0,52 MJ/kg		

Le pouvoir calorifique obtenu est comparable à celui des combustibles biomasse. Par exemple, un pouvoir calorifique de 16,3 MJ/kg a été mesuré pour le bois de pin avec écorce (Kratzeisen *et al.*, [2010](#)), 9,5 MJ/kg pour le bois vert, 15,5 MJ/kg pour le bois sec, 16,8 MJ/kg pour les granulés de bois et 19,6 MJ/kg pour l'écorce sèche (Ashton et Cassidy, [2007](#)), tandis que les boues d'épuration séchées ont un pouvoir calorifique de 11 MJ/kg (ECN, [2012](#)). À titre de comparaison avec les combustibles fossiles, le lignite a un pouvoir calorifique de 20,2 MJ/kg (ECN, [2012](#)).

Il convient de noter qu'une certaine quantité de chaleur est nécessaire pour sécher le digestat avant combustion. Le pouvoir calorifique du digestat serait inférieur si l'on tenait compte de la chaleur nécessaire au séchage. Généralement, le digestat contient une forte proportion d'eau (Drosg *et al.*, [2015](#)), qui a atteint jusqu'à 80 % dans cette étude. Après pressage mécanique, cette teneur en eau peut être réduite à 40–60 %. L'humidité restante doit être éliminée lors du séchage, pour lequel la chaleur excédentaire produite par les installations de cogénération peut être utilisée. Sachant que la chaleur latente de vaporisation de l'eau est de 2,4 MJ/kg, le pouvoir calorifique du digestat se situerait entre 9,5 et 11,4 MJ/kg pour des teneurs en eau respectives de 60 % et 40 %.

Il est généralement nécessaire d'éliminer toute l'humidité présente dans le digestat afin d'éviter l'obstruction de l'arrivée d'air et d'éventuels dommages au four (Kratzeisen *et al.*, [2010](#) ; WRAP, [2012](#)). La teneur en cendres du digestat est obtenue par pesée des cendres résiduelles après combustion des granulés de digestat dans la bombe calorimétrique. Cette teneur dépend

de la composition exacte de chaque granulé. Les teneurs mesurées se situent entre 7 % et 13 %, avec une valeur moyenne de 9 % ([tableau 2](#)). Les cendres résiduelles se présentent sous forme de granules, comme illustré sur [la figure 1](#) .



FIG. 1. Cendres résiduelles sous forme de granules obtenues par combustion du digestat.

Les granules peuvent contenir des métaux à l'état de traces tels que le magnésium (Mg), le bore (B), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le manganèse (Mn) et le cobalt (Co), ainsi que des composés inorganiques comme l'oxyde de calcium (CaO), l'oxyde de potassium (K₂O) et le pentoxyde de phosphore (P₂O₅). Ces composés ne réagissent pas lors du processus de calorimétrie (Pels et al., 2005 ; Rajamma et al., 2009) . Cependant, la composition exacte des granules n'a pu être déterminée, faute d'équipement pour la caractérisation des cendres.

Outre la combustion, le digestat peut être utilisé dans divers procédés de conversion biologique et thermochimique : pour la production de bioéthanol ou de biométhane, par pyrolyse, carbonisation hydrothermale (HTC) et carbonisation vapeur (VTC). Ces procédés peuvent être comparés en termes de rendement énergétique.

La production de bioéthanol affiche des rendements énergétiques compris entre 2,5 et 4,3 MJ/kg, la production de biométhane entre 1,8 et 6,4 MJ/kg, la pyrolyse entre 8,6 et 10,8 MJ/kg, la HTC entre 8,7 et 18,2 MJ/kg, la VTC à 11,8 MJ/kg et la combustion jusqu'à 17,3 MJ/kg (Monlau et al., [2015](#)).

Le potentiel énergétique du digestat en Croatie

D'après les résultats des mesures calorimétriques, il est possible d'estimer le potentiel énergétique du digestat en Croatie, en calculant la quantité d'énergie qui serait produite si la totalité du digestat issu des installations de biogaz croates était utilisée comme combustible. Le digestat ne peut être utilisé directement comme combustible dans les centrales à biogaz, mais il peut être transporté vers des centrales biomasse voisines, où un traitement supplémentaire est nécessaire avant la combustion (séchage, broyage et granulation).

Comme les propriétaires d'installations de biogaz en Croatie ne sont pas tenus de déclarer leurs chiffres de production de biogaz, les données relatives à la quantité de digestat produite dans le pays sont rares. Il est donc nécessaire de formuler certaines hypothèses. D'après la littérature consultée, la quantité de digestat produite par une centrale de biogaz d'une capacité électrique de 1 MW se situe entre 10 000 et 40 000 tonnes par an, selon la composition de la biomasse, le type de centrale et le type de digestion anaérobie. À titre d'exemple, l'Allemagne disposait d'une capacité installée totale de 3 352 MW en 2012, pour une production totale de digestat de 65,5 millions de m³ (Möller et Müller, [2012](#) ; Simet, [2015](#)).

En considérant que la densité du digestat est à peu près celle de l'eau ($1\ 000\ \text{kg/m}^3$), on peut calculer que chaque MW de capacité électrique de biogaz produit 19 540 tonnes de digestat par an en Allemagne.

La production de digestat issue de la digestion anaérobie en Croatie est estimée en tenant compte de l'analyse du cycle de vie du biogaz produit à partir de matières premières d'origine agricole et animale (Whiting et Azapagic, [2014](#)), présentant une composition similaire à celle des matières premières analysées dans cette étude.

Une tonne de matières premières, par le procédé de digestion anaérobie, génère $145\ \text{Nm}^3$ (soit 160 kg) de biogaz, dont 60 % de méthane, et 840 kg de digestat.

Chaque Nm^3 de biogaz produit 1,46 kWh d'électricité avec un rendement de conversion de 39 % (Whiting et Azapagic, [2014](#)).

Autrement dit, 1 MWh d'électricité est produit à partir de $685\ \text{Nm}^3$ de biogaz, tandis que près de 4 tonnes de digestat sont générées comme sous-produits.

À l'heure actuelle, la Croatie dispose d'une capacité totale installée de biogaz de 35,7 MW, tandis que 49,2 MW de capacités supplémentaires de biogaz sont en attente d'approbation et de

b

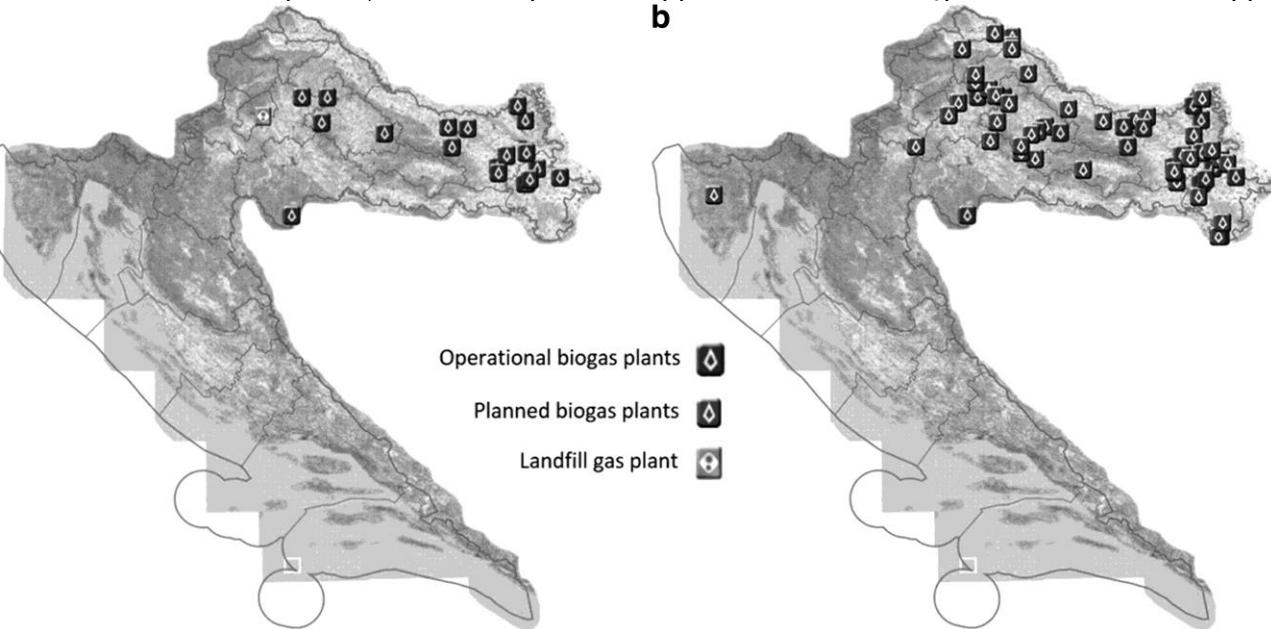


FIG. 2. Centrales électriques au biogaz et au gaz de décharge en Croatie :

a) actuellement installées : 22 installations, capacité totale 35,7 MW ;

(b) futures prévues : 70 installations, capacité totale 84,9 MW. Ministère de l'Économie, de l'Entrepreneuriat et de l'Artisanat, République de Croatie ([2016](#)).

Certaines demandes de permis pour des projets de biogaz seront rejetées, la capacité future prévue de 84,9 MW dépassant la limite actuellement fixée à 70 MW. En 2016, la capacité totale de biogaz de 35,7 MW a produit 237,3 GWh d'électricité en Croatie (Ministère de l'Environnement et de l'Énergie, République de Croatie, [2016](#)).

Ainsi, chaque MW de capacité de biogaz produit en moyenne 6 650 MWh d'électricité et 26 600 tonnes de digestat. La teneur en matière sèche du digestat est de 20,5 % ([tableau 1](#)), ce qui

signifie que chaque MW de capacité installée produit 5 450 tonnes de digestat sec par an. Au rythme actuel d'installation des nouvelles capacités de biogaz, la limite de 70 MW sera atteinte d'ici un à deux ans. Ces 70 MW de capacité de biogaz produiront alors une quantité annuelle totale de 381 500 tonnes de digestat sec.

En supposant que toutes les centrales à biogaz de Croatie utilisent des matières premières de composition comparable, le pouvoir calorifique moyen du digestat séché serait de 13 MJ/kg, d'après les mesures calorimétriques présentées. L'énergie thermique nécessaire au séchage du digestat est généralement fournie par l'unité de cogénération, caractéristique des centrales à biogaz et à biomasse.

Le contenu énergétique thermique du digestat sec total est de $49,6 \times 10^8$ MJ, soit 1 380 GWh. Avec un rendement de conversion électrique moyen de 39 % dans les centrales à biogaz, la production annuelle d'électricité à partir du digestat serait de 538 GWh. Sachant que l'ensemble des centrales électriques croates ont produit 12,8 TWh d'électricité en 2016 (base de données Eurostat, [2016](#)), la production estimée d'électricité à partir du digestat représenterait 4,2 % de la production nationale.

Aspects économiques du digestat

En Croatie, le digestat est généralement éliminé en décharge ou utilisé comme engrais sur les terres agricoles, car ce sont les solutions les plus simples. Cependant, le digestat séché et granulé pourrait servir de combustible d'appoint économique dans les centrales biomasse, d'autant plus que les centrales biomasse et biogaz sont généralement implantées dans les mêmes zones riches en déchets agricoles et forestiers. C'est le cas dans la région continentale de la Croatie, où l'agriculture et la sylviculture sont toutes deux développées, comme le montre la [figure 3](#).

Le digestat, sous-produit des centrales biogaz, peut être vendu et transporté vers les centrales biomasse les plus proches. Le coût du digestat comprend donc les éléments suivants : achat et transport (coûts des matières premières), séchage, granulation, stockage et main-d'œuvre sur le site de la centrale biomasse.

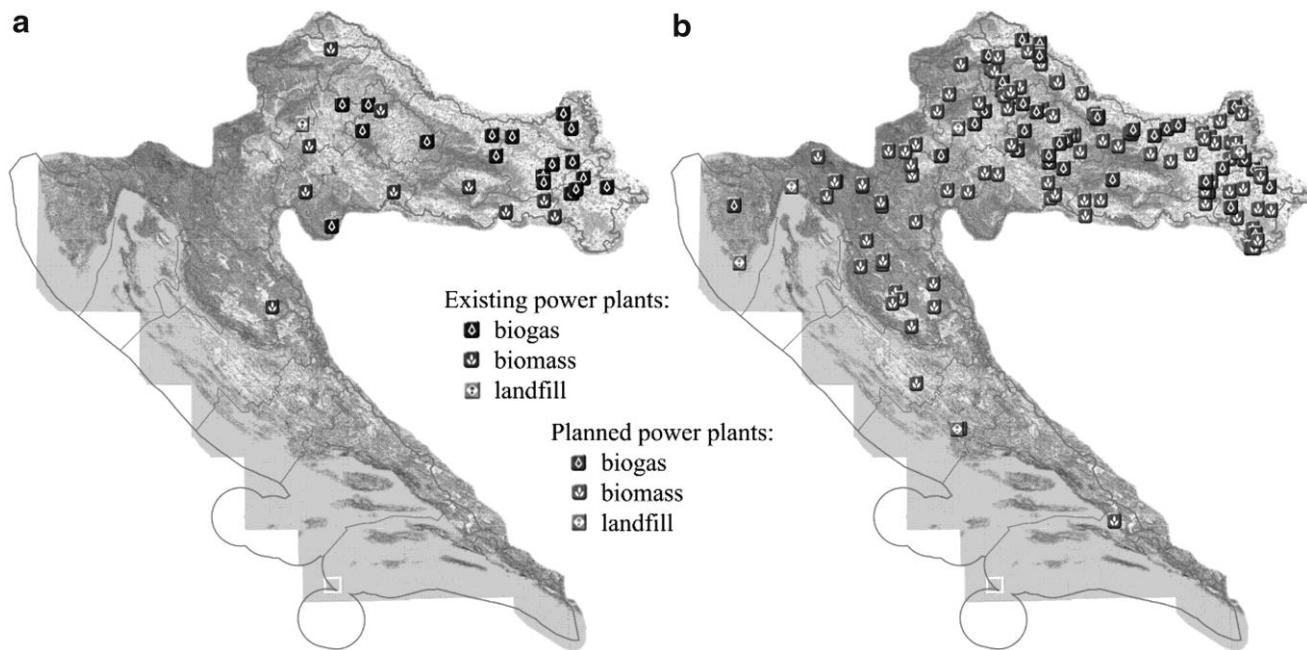


FIG. 3. Localisation des centrales de biogaz, de biomasse et de valorisation énergétique des déchets en Croatie :

(a) actuellement installées,

(b) futures planifiées. Ministère de l'Économie, de l'Entrepreneuriat et de l'Artisanat, République de Croatie ([2016](#)).

De manière générale, le coût de production des granulés dépend du prix de l'énergie (combustible pour le séchage et électricité pour le fonctionnement de l'usine), du coût de la main-d'œuvre et de la maintenance, ainsi que de la taille et de la capacité de production de l'usine de granulation. Par exemple, le coût total de production de granulés non ligneux (paille) en Irlande est de 100 €/t (Nolan *et al.*, 2010), réparti comme suit : matières premières et séchage : 50 %, broyage et granulation : 20 %, transport : 15 %, main-d'œuvre : 10 % et autres : 5 %. En Autriche, le coût de production des granulés est d'environ 90 €/t et de 60 €/t en Suède (Thek et Obernberger, 2004).

Le coût de production des granulés à partir de biomasse ligneuse est encore plus faible en Amérique du Nord, entre 40 et 50 €/t (Mani *et al.*, 2006), selon le combustible utilisé pour le séchage.

La répartition des coûts des différentes opérations de traitement est la suivante : matières premières et transport 40 %, main-d'œuvre 25 %, séchage 20 % et granulation 15 %.

En Croatie, le coût de la biomasse issue de terres agricoles non utilisées se situe entre 40 et 50 €/t, tandis que les coûts de transport s'élèvent à 0,1 €/(t·km) (Pfeifer *et al.*, 2016).

Le traitement par granulation et la main-d'œuvre sont estimés respectivement à 20 €/t et 10 €/t. Le coût total du digestat, transport et séchage compris, serait ainsi d'environ 60 €/t, hors granulation.

Si la granulation est nécessaire, le coût du digestat serait d'environ 80 €/t. En Croatie, les centrales biomasse sont considérées comme des énergies renouvelables et fonctionnent dans le cadre du système de tarif d'achat subventionné. Le tarif d'achat pour l'électricité produite par ces centrales est de 200 €/MWh pour les centrales d'une puissance installée inférieure ou égale à 1 MW et de 147 €/MWh pour les centrales de plus grande puissance (Ministère de l'Environnement et de l'Énergie, République de Croatie, 2016).

Le contenu énergétique thermique du digestat est de 3,6 MWh par tonne, son pouvoir calorifique étant de 13 MJ/kg.

En supposant un rendement de conversion énergétique moyen de 39 % pour une centrale biomasse, l'électricité produite serait de 1,4 MWh par tonne de digestat. Dans le cadre du système actuel de tarif d'achat (FiT), l'électricité produite à partir d'une tonne de digestat sec est valorisée entre 206 et 280 € par tonne, selon la capacité installée de la centrale. La différence nette entre la valeur de l'électricité produite et le coût total du digestat comme combustible dans la centrale se situe entre 126 et 200 € par tonne, comme indiqué dans [le tableau 3](#).

Ceci démontre que l'utilisation du digestat comme combustible d'appoint serait avantageuse tant pour la production de biogaz que pour la centrale biomasse.

Tableau 3. Analyse économique du digestat

<i>Opération de processus</i>	<i>Coût/valeur du digestat séché</i>
Matières premières et séchage	40 €/t
Coût de la granulation	20 €/t
Coût du transport	10 €/t
Coût de la main-d'œuvre et de l'entretien	10 €/t
Coût total du digestat	80 €/t
Valeur de l'électricité produite par une petite centrale biomasse (≤ 1 MW)	260 €/t
Valeur de l'électricité produite par une grande centrale biomasse (≥ 1 MW)	190 €/t
Différence nette	110–180 €/t
Récupération de nutriments précieux	

Le potentiel de production d'énergie du digestat est comparable à celui d'autres combustibles solides issus de la biomasse, d'autant plus que le digestat est un sous-produit de la production de biogaz et est généralement mis en décharge. Cependant, sa valeur nutritive doit également être prise en compte.

Le digestat contient de grandes quantités d'éléments nutritifs précieux qui favorisent la croissance des plantes (azote, phosphore et potassium). Comme mentionné précédemment, après combustion, ces éléments nutritifs se retrouvent sous forme de cendres, généralement mises en décharge.

De cette manière, ils deviennent des déchets et ne peuvent être réutilisés durablement. Face à la raréfaction croissante des éléments nutritifs précieux (notamment le phosphore) à l'échelle mondiale, il est devenu nécessaire d'améliorer les procédés d'extraction de ces éléments.

Des procédés chimiques par voie humide et thermochimiques, capables d'extraire le phosphore, ont été développés pour résoudre ce problème.

Ces méthodes permettent d'extraire le phosphore des cendres produites et cet élément nutritif peut être utilisé directement pour l'épandage sur les terres agricoles ou comme co-matière première dans la production d'engrais spécifiques.

Cependant, ces deux procédés sont énergivores. Le procédé chimique par voie humide nécessite une grande quantité de produits chimiques et le procédé thermochimique est très énergivore, ce qui augmente les coûts d'exploitation des deux procédés (Sartorius *et al.*, 2011). Un autre problème lié aux produits chimiques nécessaires à l'extraction du phosphore réside dans la présence de métaux qui se dissolvent simultanément avec ce dernier (Donatello et Cheeseman, 2013), ce qui restreint son application directe sur les terres et limite la production d'engrais phosphatés. Par conséquent, ce domaine de recherche suscite un intérêt croissant, d'autant plus que la législation européenne encadre la valorisation des nutriments contenus dans les déchets.

Conclusions

Le pouvoir calorifique du digestat, de 13 MJ/kg et déterminé par calorimétrie, confirme que le digestat peut être considéré comme une alternative intéressante aux combustibles solides issus de la biomasse, d'autant plus qu'il s'agit d'un sous-produit de la digestion anaérobiose qui finit généralement en décharge ou en exploitation agricole.

Le potentiel énergétique du digestat en Croatie est considérable.

On estime que les 70 MW de capacités de production de biogaz du pays permettraient de produire 381 500 tonnes de digestat par an. L'énergie thermique contenue dans cette quantité de digestat est de 1 380 GWh, qui pourraient être convertis en 538 GWh d'électricité avec un rendement de 39 %.

Cette électricité représenterait 4,2 % de la production totale d'électricité en Croatie. Malgré son potentiel énergétique, le digestat n'est pas encore reconnu comme une source d'énergie ni comme une source de nutriments (en vue de leur extraction).

Le digestat ne peut être utilisé directement dans les centrales de biogaz, mais il peut être transporté vers des centrales biomasse voisines et utilisé comme combustible alternatif économique aux combustibles biomasse solides.

En Croatie, les centrales de biogaz et de biomasse sont implantées dans les mêmes régions, où les déchets agricoles, forestiers et d'élevage sont disponibles en grande quantité. L'analyse économique a révélé que le revenu potentiel de l'électricité produite à partir du digestat est deux à trois fois supérieur à son coût total, incluant les matières premières, le séchage et le transport.

Par conséquent, l'utilisation du digestat comme combustible d'appoint serait financièrement avantageuse pour les centrales de biogaz comme pour celles de biomasse.

Le principal avantage du digestat réside dans son pouvoir calorifique, comparable à celui des combustibles ligneux, et dans sa compatibilité avec les centrales biomasse sans adaptation particulière.

En revanche, son principal inconvénient est le coût énergétique de son séchage et sa teneur élevée en cendres.

Néanmoins, l'énergie thermique produite par les centrales de cogénération biomasse pourrait être efficacement utilisée pour le séchage du digestat. Dans cette étude, la teneur en cendres du digestat a été mesurée à environ 9 %.

Bien que ces cendres résiduelles doivent être extraites périodiquement du four biomasse, elles pourraient constituer une matière première intéressante pour l'extraction de nutriments précieux. La combustion du digestat représente une piste prometteuse pour la production d'électricité et la génération de revenus supplémentaires pour les centrales de biogaz et de biomasse, même si le digestat pourrait trouver d'autres applications non énergétiques, notamment comme source précieuse de nutriments.

Dans ce cas, les nutriments seraient extraits du digestat sous forme de struvite immédiatement après la digestion anaérobiose, tandis que les boues restantes seraient utilisées comme engrais.

Déclaration de l'auteur

Il n'existe aucun conflit d'intérêts financiers.

Références

Ashton C. et Cassidy P. (2007). Notions de base sur l'énergie. Dans *Foresterie durable pour la bioénergie et les produits biosourcés : programme de formation des formateurs* (pp. 189–192). Athènes : Southern Forest Research Partnership.

[Google Scholar](#)

Christen D., Badstuebner U., Biela J. et Kolar J. (2010). Mesure calorimétrique des pertes de puissance pour les convertisseurs à haut rendement. Dans : Actes de la Conférence internationale sur l'électronique de puissance 2010. Sapporo, Japon.

[Crossref](#)

[Google Scholar](#)

Donatello S., et Cheeseman C. (2013). Voies de recyclage et de récupération des cendres de boues d'épuration incinérées (ISSA) : une revue. *Waste Manage* . 33, 2328.

[Crossref](#)

[Google Scholar](#)

Drosg B., Fuchs W., Saedi TA, Madsen M. et Linke B. (2015). *Récupération des nutriments par traitement du digestat de biogaz* . Berlin, Allemagne : IEA Bioenergy.

[Google Scholar](#)

ECN. (2012). *Base de données sur la biomasse et les déchets* . Phyllis2. Disponible sur : <https://www.ecn.nl/phyllis2/Browse/Standard/ECN-Phyllis> (consulté le 14 février 2017).

[Crossref](#)

[Google Scholar](#)

Association européenne du biogaz. (2016). *Rapport sur le biométhane et le biogaz 2015*. Belgique.

Disponible sur : <http://european-biogas.eu/2015/12/16/biogasreport2015> (consulté le 14 février 2018).

[Google Scholar](#)

Communauté économique européenne. (1991). *Directive 91/676/CEE du Conseil du 12 décembre 1991 relative à la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole* . Bruxelles, Belgique : Conseil européen.

[Crossref](#)

[Google Scholar](#)

Base de données Eurostat. (2016). *Offre, transformation et consommation d'électricité – Données annuelles* . Disponible sur : <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database> (consulté le 14 janvier 2018).

[Crossref](#)

[Google Scholar](#)

Hossain A., Serrano C., Brammer J., Omran A., Ahmed F., Smith D. et Davies P. (2016). Combustion de mélanges de carburants contenant de l'huile de pyrolyse de digestat dans un moteur à allumage par compression multicylindre. *Fuel* , 171, 18.

[Crossref](#)

[Google Scholar](#)

Kratzeisen M., Starčević N., Martinov M., Maurer C. et Muller J. (2010). Applicabilité du digestat de biogaz comme combustible solide. *Fuel* . 2544.

[Crossref](#)

[Google Scholar](#)

Mani S., Sokhansanj S. et Turhollow XB (2006). Économie de la production de granulés combustibles à partir de biomasse. *Appl. Eng. Agric.* , 22, 421.

[Crossref](#)

[Web of Science](#)

[Google Scholar](#)

Ministère de l'Économie, de l'Entrepreneuriat et de l'Artisanat de la République de Croatie. (2016). *Carte interactive des sources d'énergie renouvelables en Croatie* . Disponible sur

: <https://oie-aplikacije.mingo.hr/InteraktivnaKarta> (consulté le 1er février 2017).

[Crossref](#)

[Google Scholar](#)

Ministère de l'Environnement et de l'Énergie, République de Croatie. (2016). *L'énergie en Croatie — Rapport annuel sur l'énergie 2016*. Disponible sur

: www.eihp.hr/wp-content/uploads/2018/03/EUH2016.pdf (consulté le 1er avril 2018).

[Crossref](#)

[Google Scholar](#)

Möller K., et Müller T. (2012). Effets de la digestion anaérobie sur la disponibilité des nutriments du digestat et la croissance des cultures : une revue. *Eng. Life Sci.* , 12, 242.

[Crossref](#)

[Google Scholar](#)

Monlau F., Sambusiti C., Antoniou N., Bakarat A. et Zabaniotou A. (2015). Un nouveau concept pour améliorer la récupération d'énergie à partir de résidus agricoles par couplage de la digestion anaérobie et de la pyrolyse. *Appl. Energy.* , 148, 32.

[Crossref](#)

[Google Scholar](#)

Neumann J., Meyer J., Ouadi M., Apfelbacher A., Binder S. et Hornung A. (2016). La conversion des déchets de digestion anaérobie en biocarburants via un nouveau procédé de reformage thermocatalytique. *Waste Manage* . 47(A), 141.

[Crossref](#)

[Google Scholar](#)

Nolan A., McDonnell K., Devlin G., Carroll J. et Finnane J. (2010). Analyse économique des coûts de fabrication de granulés en République d'Irlande à partir de biomasse non ligneuse. *Open Renewable Energy J.* 3, 1.

[Crossref](#)

[Google Scholar](#)

Pedrazzi S., Allesina G., Bello T., Rinaldini C. et Tartarini P. (2015). Digérer comme biocarburant dans les fours domestiques. *Processus de carburant. Technologie.* , 130, 172.

[Crossref](#)

[Google Scholar](#)

Pels J., Nie DD et Kiel J. (2005). Utilisation des cendres issues de la combustion et de la gazéification de la biomasse. Dans : 14e Conférence et exposition européenne sur la biomasse. Paris, France.

[Google Scholar](#)

Pfeifer A., Dominković D., Ćosić B., et Duić N. (2016). Faisabilité économique des installations de cogénération alimentées par la biomasse provenant de terres agricoles non utilisées : le cas de la Croatie. *Energy Convers Manage* . 125, 222.

[Crossref](#)

[Google Scholar](#)

Rajamma R., Ball R., Tarelho L., Allen G., Labrincha J., et Ferreira VM (2009). Caractérisation et utilisation des cendres volantes de biomasse dans les matériaux à base de ciment. *J. Hazard. Mater.* , 172, 1049.

[Crossref](#)

[Google Scholar](#)

Rutz D., Mergner R. et Janssen R. (2012). *Utilisation durable de la chaleur des installations de biogaz* . Munich : 2012 WIP Énergies renouvelables.

[Google Scholar](#)

Saedi TA, Rutz D., Prassl H., Kottner M., Finsterwalder T., Volk S. et Janssen R. (2008). Compléments sur la digestion anaérobie (DA). Dans Saedi T., éd., *Manuel du biogaz* . Esbjerg, Danemark : Université du Danemark du Sud Esbjerg, Intelligent Energy Europe.

[Google Scholar](#)

Sartorius C., Horn JV et Tettenborn F. (2011). Récupération du phosphore des eaux usées : état de l'art et potentiel futur. Dans : *Récupération et gestion des nutriments 2011 — À l'intérieur et à l'extérieur de la barrière* . Miami, Floride.

[Crossref](#)

[Google Scholar](#)

Simet A. (2015). *Biomass Magazine* . Disponible sur

: <http://biomassmagazine.com/articles/13590/german-biogas-industry-adds-150-plants-in-2015> (consulté le 24 janvier 2017).

[Google Scholar](#)

Thek G., et Obernberger I. (2004). Coûts de production des granulés de bois dans le cadre autrichien et en comparaison avec le cadre suédois. *Biomass Bioenergy* . 27, 671.

[Crossref](#)

[Google Scholar](#)

Vindiš P., Muršec B., Rozman Č. et Čus F. (2010). Une évaluation multicritère des cultures énergétiques pour le biogaz. *J. Mech. Ing.* , 56, 63.

[Google Scholar](#)

Whiting A., et Azapagic A. (2014). Impacts environnementaux du cycle de vie de la production d'électricité et de chaleur à partir de biogaz produit par digestion anaérobie. *Energy* , 148, 181.

[Crossref](#)

[Google Scholar](#)

WRAP. (2012). Amélioration et traitement des digestats issus de la digestion anaérobiose. www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Digesates%20from%20Anaerobic%20Digestion%20A%20review%20of%20enhancement%20techniques%20and%20novel%20digestate%20products_0.pdf (consulté le 4 janvier 2018).

[Google Scholar](#)

Articles similaires :

- Accès restreint

[Tendances et progrès en matière de production de bioénergie et de gestion durable des déchets solides](#)

- Accès restreint

[Technologie d'incinération des déchets pour la valorisation énergétique : développements récents dans le contexte des changements climatiques](#)

- Accès libre

[État des lieux de la valorisation énergétique des déchets en Allemagne, Partie I – Installations de traitement des déchets](#)

Sage recommande :

- **Connaissances SAGE**

Entrée

[Production combinée de chaleur et d'électricité \(cogénération\)](#)

- **Connaissances SAGE**

Chapitre de livre

[Énergie](#)

- **Connaissances SAGE**

Entrée

[Cogénération](#)

Également de Sage