



Mai.  
2018

# PROJET GAZEOTHERM



Valorisation Energétique d'un  
Large Spectre de Biomasses par  
Pyrogazéification et Combustion  
Intégrée

Rapport de synthèse  
non confidentiel

ADEME



Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Energie

En partenariat avec : MINI GREEN POWER et le CIRAD

 Mini  
Green Power  
Inventons l'énergie de demain

 cirad  
LA RECHERCHE AGRONOMIQUE  
POUR LE DÉVELOPPEMENT

# 1. Contexte du projet

En France comme dans de nombreux pays du monde, la biomasse représente un potentiel important pour la production d'énergie renouvelable. Cependant, cette ressource est encore largement sous-exploitée. La biomasse, en grande partie constituée de résidus végétaux, est généralement traitée comme un déchet : elle est collectée et acheminée vers des centres de traitement à grande échelle. Ce mode de gestion entraîne des coûts logistiques élevés et ne se prête pas à une valorisation énergétique efficiente de la ressource. En effet, l'énergie produite, chaleur ou électricité, doit être redistribuée vers les utilisateurs, avec des pertes et des coûts souvent élevés. A l'inverse, une gestion décentralisée, avec une valorisation locale de la biomasse pour satisfaire des besoins énergétiques locaux, serait beaucoup plus rationnelle et efficiente.

Pour permettre le développement de circuits courts de valorisation de la biomasse en énergie, il est indispensable de disposer de solutions technologiques fiables et rentables à petite échelle. Or, l'offre commerciale est encore très limitée dans ce domaine, malgré une très forte demande sur le marché.

Fort de ce constat, Mini Green Power (MGP) s'est donnée pour mission de relever ce défi technique en développant la Mini Centrale Verte (MCV). La MCV est une centrale biomasse de petite puissance capable de valoriser une large gamme de résidus végétaux pour produire différents types d'énergies (chaleur, électricité, froid) afin de répondre à des besoins locaux. Elle est conçue de manière modulaire et comprend :

- un module de stockage et d'alimentation de la biomasse
- un module de gazéification et de production d'eau chaude ou surchauffée
- un module de valorisation de cette eau chaude pour la cogénération d'électricité et chaleur, le séchage, le chauffage, la purification d'eau, la fabrication de froid ou d'autres utilisations de chaleur.

Le projet GAZEOTHERM répond à plusieurs enjeux de l'appel à projets BIP, particulièrement vis-à-vis du thème « *sobriété matière et énergétique de l'ensemble de la chaîne de valeur* ». L'approche système menée par Mini Green Power, vise à optimiser l'ensemble de la chaîne de valeur de la production d'énergie - depuis le choix du combustible, son transport jusqu'au lieu de transformation, le procédé de valorisation énergétique, et la distribution ou consommation locale de l'énergie produite.

Vis-à-vis du combustible, le choix s'est résolument porté sur l'utilisation de biomasses localement disponibles, n'ayant pas ou peu de filières de valorisation. Ce choix permet de viser une matière première peu coûteuse car peu concurrencée par des usages alternatifs et considérée actuellement comme un déchet. De plus, il permet de s'affranchir des coûts de transports et des conséquences environnementales qui en résultent. Il permet aussi de traiter des quantités de biomasses raisonnables, limitant ainsi la taille et la puissance de la mini centrale verte, et autorisant une intégration in situ des installations, au plus proche des zones de collecte de la biomasse. Les biomasses visées sur lesquelles il n'y aura pas de conflit d'usage sont typiquement les déchets verts des collectivités, les résidus d'exploitations forestières, les refus de compost, ou les résidus de l'industrie agroalimentaire (coques de noix, noyaux, ...). Ce choix répond aux enjeux « *recyclage des déchets* » qui a été identifié comme l'un des maillons clés de la transition écologique, et « *diversification des bioressources exploitées et de maximisation de l'utilisation de la biomasse récoltée* » compte tenu des surfaces agricoles et forestières limitées.

En amont du projet Gazéotherm, MGP avait déjà mis au point dans son atelier un premier démonstrateur de MCV, en version basse température, le Gazéotherm BT. Ce premier prototype était destiné principalement à la production de chaleur car la température de l'eau produite était limitée à 110 °C. Il a permis de démontrer l'efficacité de la technologie de gazéification. MGP a donc lancé le projet GAZEOTHERM afin de mettre au point une version industrielle et commercialisable de sa centrale.

Le projet GAZEOTHERM concerne le développement et la construction d'un démonstrateur de MCV d'une puissance thermique de 550 kW produisant de la chaleur à 180 °C. Ce démonstrateur sera appelé Gazéotherm HT par la suite. Cette température plus élevée que la version BT élargit le nombre d'applications possibles par rapport au Gazéotherm BT, avec par exemple la possibilité de produire de l'électricité au moyen de turbines ORC (Organic Rankine Cycle) à meilleur rendement que les ORC fonctionnant à température de 110 °C, ou encore la production de vapeur saturée.

Le projet est axé en particulier sur la mise au point et la fiabilisation des deux premiers modules, permettant l'alimentation des différentes biomasses cibles, et la production de chaleur maîtrisée à différents régimes de fonctionnement.

## 2. Méthodologie du projet

Les installations de production de chaleur et/ou d'électricité d'une puissance inférieure à 2 MW exigent dans leur grande majorité des caractéristiques de combustibles très précises. Elles sont donc limitées à des types de ressources très particuliers, et ne permettent pas de valoriser l'ensemble des ressources locales disponibles.

L'objectif global de ce projet est de proposer un réacteur commercial de valorisation de la biomasse présentant une grande flexibilité vis-à-vis de la nature de la ressource. Ce réacteur doit être d'une puissance inférieure à 2 MW et doit présenter un degré d'automatisation suffisant pour limiter les interventions humaines. Il doit aussi évidemment respecter les normes d'émissions gazeuses des unités de combustion de cette dimension.

Les objectifs du projet GAZEOTHERM sont donc multiples :

- Valider et caractériser les performances du procédé de gazéification breveté par Mini Green Power, pour une large gamme de biomasses de natures et de formes variées.
- Mesurer les concentrations des émissions gazeuses, et s'assurer qu'elles respectent les normes en vigueur ;
- Commercialiser et industrialiser le procédé en limitant autant que possible les interventions humaines, avec une gestion et un contrôle commande permettant une automatisation du procédé :
  - Développement d'un système de décendrage automatique
  - Mise au point d'une unité de contrôle commande élaborée permettant le fonctionnement automatisé, le suivi technique à distance et l'acquisition des données.

## 3. Principaux résultats obtenus

### 3.1. Développement du contrôle commande

Le système de contrôle commande a été conçu pour répondre aux exigences suivantes :

- Une autonomie sans surveillance humaine continue
- Un système fiable dans la régulation, même en environnement hostile
- Un niveau de sécurité élevé, particulièrement en cas d'incident ou accident externe impactant la mini centrale
- Une opération facile par des opérateurs non experts en local ou à distance
- Une assistance à l'opération à distance facile par les experts de MGP
- Un dépannage à distance facile par des experts
- Une optimisation continue à distance possible.

Le contrôle-commande permet de démarrer et d'arrêter la centrale automatiquement, de réguler la température en sortie de chaudière sur une consigne et d'assurer la stabilité de la puissance délivrée (voir Figure 1). Les séquences de sécurité ont aussi été validées comme la sécurisation de l'alimentation électrique par un groupe électrogène en cas de perte réseau. Un démarrage hors réseau a été réalisé et deux coupures du réseau ont eu lieu durant les essais permettant de complètement valider la sécurisation de notre centrale. La sécurité incendie de l'installation a aussi été validée.



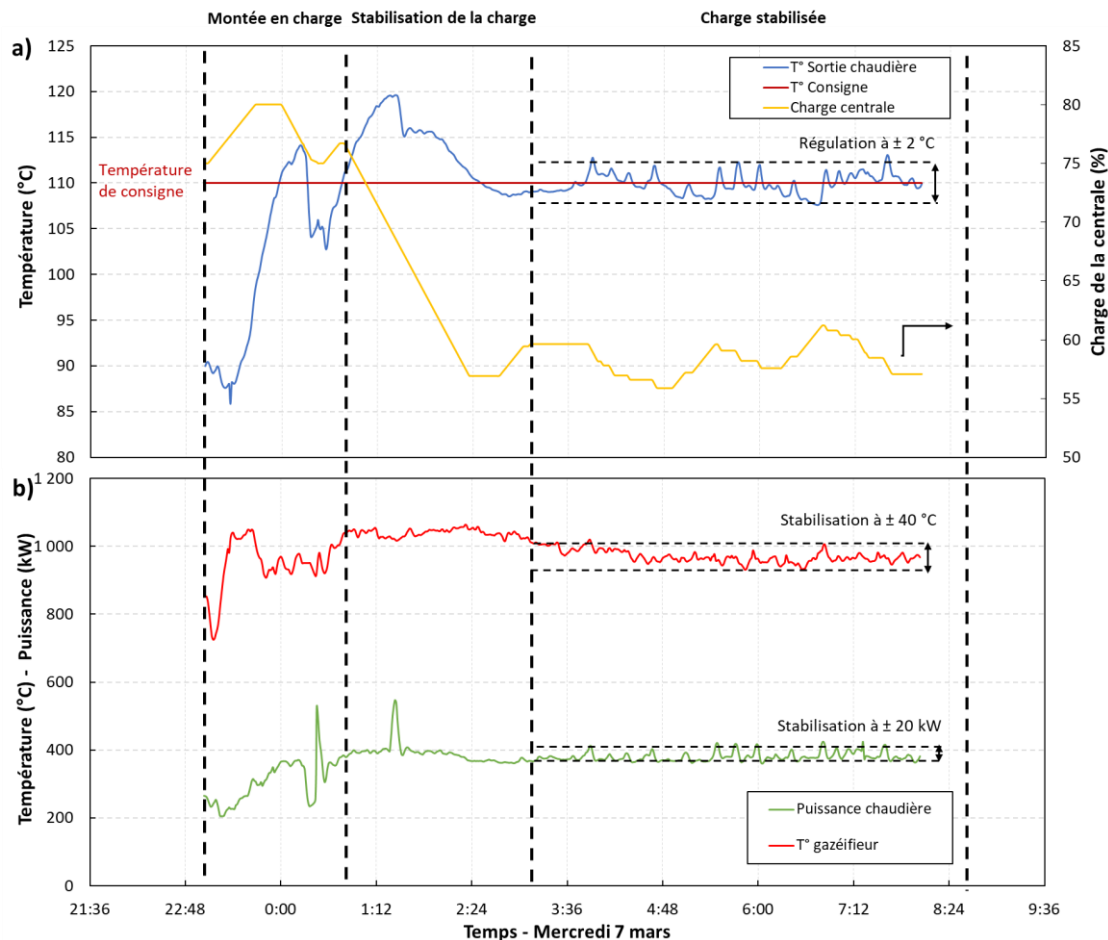


Figure 1: Evolution de la température en sortie de chaudière autour de la consigne (a) et évolutions de la puissance fournie par la chaudière et de la température dans le réacteur (b) au cours du temps

### 3.2. Développement du démonstrateur

Le démonstrateur est composé :

- d'un module de stockage et de convoyage de la biomasse. Un module containerisé et des séquences de convoyage automatisées permettent d'assurer une alimentation continue et sécurisée en biomasse
- Un module de gazéification et de production d'eau surchauffée composée d'un réacteur de gazéification, d'un tube de post-combustion, d'un filtre cyclonique chaud et d'un échangeur fumées/eau. Des modifications ont été apportées par rapport au premier démonstrateur : 1) l'alimentation de la biomasse se fait par le bas du réacteur. Cela permet un étalement homogène de la biomasse sur la grille et évite des passages préférentiels d'air responsables de la production de NOx. 2) Le tube de post-combustion est plus long que sur le démonstrateur précédent pour augmenter le temps de séjour des fumées à plus de 800 °C afin de limiter les imbrûlés tels que le CO. 3) Le filtre cyclonique en amont de la chaudière permet de récupérer une grande partie des poussières pour limiter l'abrasion et l'encrassement de la chaudière.
- Différents modules de valorisation de la chaleur : un sécheur de 550 kWth et un ORC de 60kW électrique. Ils sont développés en parallèle de l'unité de production de chaleur.

Les modifications que sont l'alimentation du gazéifieur par le bas du réacteur, l'allongement du tube de post-combustion et le filtre cyclonique chaud ont tous trois été validés et ont permis d'améliorer sensiblement les résultats obtenus surtout sur l'encrassement de la chaudière et les émissions de CO.

### 3.3. Résultats sur le démonstrateur Gazéotherm HT

Une série d'essais a été menée avec 4 biomasses différentes dont les principales propriétés sont données dans le tableau 1 :

Tableau 1 : Résultats d'analyse des 4 biomasses testées lors de la semaine du 5 au 9 mars 2018

	Broyat de palette	Résidus d'élagage	Canne de Provence	Balle de riz
Humidité (% MB) *	24 – 39	13	5	40
Taux de cendres (% MS)	2,1	4,1	3,8	17,8
C (% MS)	50,1	49,6	47,6	40,6
H (% MS)	5,24	5,46	5,46	4,88
O (% MS)	41,9	40,4	42,7	35,8
N (% MS)	0,6	0,4	0,4	0,9
S (% MS)	0,03	0,07	0,12	-
Cl (% MS)	0,018	0,19	0,72	-
PCI (MJ/kg MB)	10,8 - 14	16,1	16,9	8,1

\* L'humidité a été mesurée sur site durant les essais et elle a pu varier pour un combustible donné

Les principales données mesurées sont les émissions en CO et NOx, la teneur en O<sub>2</sub>, les températures dans le gazéifieur, dans le tube de post-combustion et en sortie de chaudière, la répartition et la composition des cendres produites et la composition du syngaz dans le gazéifieur.

Les principaux enseignements de ces essais sont les suivants :

- Mesures d'émissions en CO et NOx :  
Des mesures ont été effectuées en faisant varier les paramètres opératoires que sont les 3 débits d'air (primaire, secondaire et tertiaire), le débit et la nature de la biomasse. Ces mesures ont montré que le démonstrateur respectait les valeurs limites d'émissions (VLE) : 525 mg/Nm<sup>3</sup> pour les NOx et 250 mg/Nm<sup>3</sup> pour le CO à 6 % d'O<sub>2</sub>. La moyenne d'émission en NOx sur tous les essais est de 360 mg/Nm<sup>3</sup> tout en maintenant des émissions de CO en dessous de 100 mg/Nm<sup>3</sup> (moyenne de 40 mg/Nm<sup>3</sup>).
- Rendements énergétiques :  
Les rendements énergétiques ont été mesurés par la méthode de la déperdition thermique définie par la norme française NF EN 12953-11. Les résultats obtenus pour les différentes biomasses sont présentés dans la figure 2.

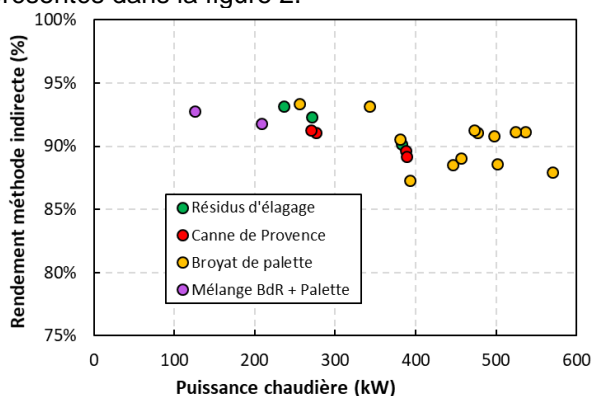


Figure 2 : Evolution du rendement estimé par la méthode de la déperdition thermique en fonction de la puissance de la chaudière

Le rendement ainsi mesuré varie de 87 à 94 % avec une moyenne de 90,7 %.

Le rendement a aussi été calculé de manière directe en faisant le rapport entre la puissance thermique mesurée en sortie de chaudière et la puissance thermique PCI de la biomasse injectée. Le rendement ainsi calculé varie entre 70 à 90 %. Ces résultats présentent une plus

grande incertitude de mesure de l'ordre de 10 % (incertitude sur l'humidité et le débit de biomasse).

- Mesure de la composition du gaz de synthèse dans le gazéifieur :

Des mesures de la composition du gaz de synthèse ont été réalisées dans le gazéifieur à l'aide d'un micro-chromatographe gaz et d'un dispositif de capture des goudrons. Les résultats obtenus montrent que le gazéifieur produit un gaz riche en CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O et CH<sub>4</sub> (voir figure 3 a) et b))

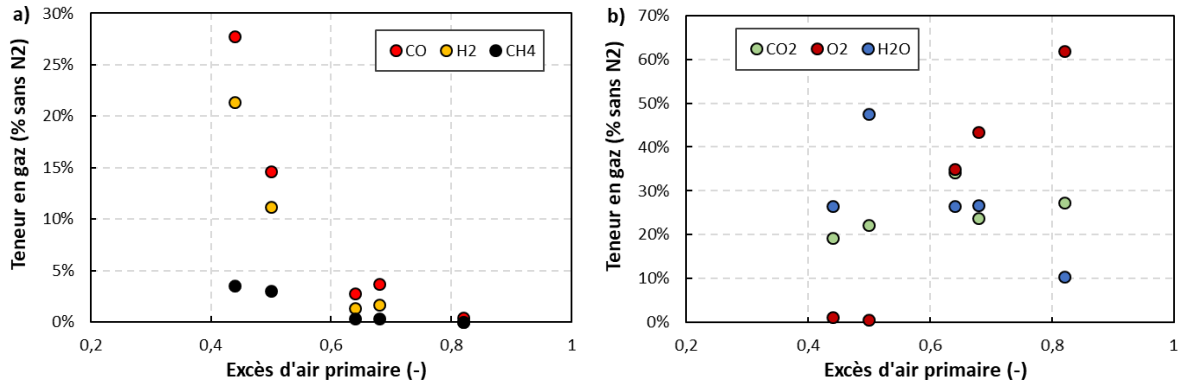


Figure 31 : Evolution des teneurs en a) CO, H<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> et en b) CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O et O<sub>2</sub> dans le gazéifieur en fonction de l'excès d'air primaire

Les teneurs maximales en goudrons sont obtenues au plus faibles excès d'air ( $\lambda = 0,44$ ) et sont de 5 à 6 g/Nm<sup>3</sup>.

- Répartition et composition des cendres :

Les cendres sont récupérées à trois niveaux de la centrale : sous le gazéifieur, sous le filtre cyclonique et sous le filtre à manche. La répartition des cendres en masse aux trois de récolte est présentée dans la figure 4.

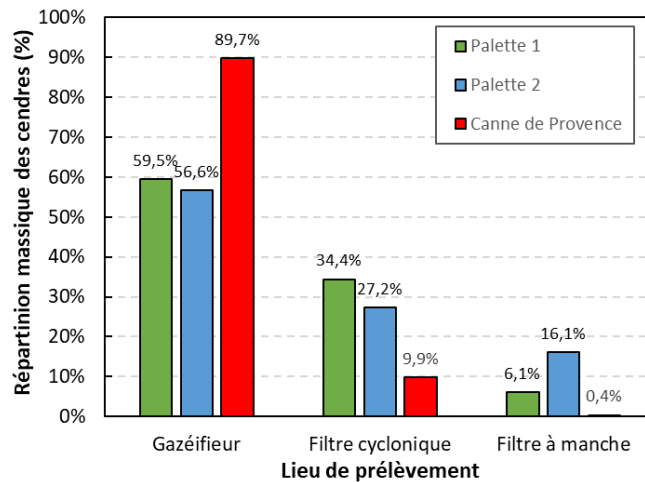


Figure 4 : Répartition en masse des cendres aux trois points de récolte

On peut noter que le filtre cyclonique en amont de la chaudière permet de récupérer entre 35 et 10 % des cendres ce qui assure une bonne protection de la chaudière contre l'encrassement et l'abrasion et augmente sa durée de vie.

Les analyses réalisées montrent que les cendres sous gazéifieur respectent la norme et peuvent faire l'objet d'un plan d'épandage. Les cendres sous le filtre cyclonique chaud sont généralement trop chargées en chrome et les cendres sous filtre à manche contiennent de

grandes quantités de Cadmium, Chrome, Plomb et Zinc et ne peuvent pas faire l'objet d'un plan d'épandage. Ces dernières représentent entre 0,4 et 16 % des cendres totales produites.

### 3.4. Développement du décendrage automatique

Le décendrage automatique du foyer de gazéification est un point clé pour le développement et la commercialisation du procédé de MGP. Cela facilite l'exploitation, augmente la disponibilité de la centrale, diminue les risques d'accident, stabilise le fonctionnement de la centrale et donc diminue les périodes transitoires lors desquelles les émissions sont élevées.

Trois systèmes de décendrage ont été développés consécutivement ou en parallèle avec des principes de fonctionnement différents (barreaux rotatifs, plateaux rotatifs et grille vibrante). La preuve de concept a été réalisée pour deux systèmes qui sont actuellement en cours de test et qui subissent des améliorations constantes. Un des deux modèles est à un niveau de maturité industrielle. Il fait l'objet de développements supplémentaires pour augmenter le taux de cendres maximal admissible et pour optimiser le fonctionnement continu. Le fait de disposer de deux démonstrateurs nous a permis d'avancer très rapidement sur ce sujet.

Entre autres résultats, un brevet a été déposé sur un des systèmes de décendrage développé.

## 4. Conclusion

L'objectif principal du projet GAZEOTHERM a été le développement d'un réacteur commercial de valorisation de la biomasse présentant une grande flexibilité vis-à-vis de la nature de la ressource.

Pour ce faire un démonstrateur complet de 550 kW a été dimensionné, construit, mis en route et automatisé. Plusieurs améliorations ont été implémentées (alimentation par le centre, tube de post-combustion allongé, filtre cyclonique en amont de la chaudière) et des essais ont été réalisés avec différentes biomasses (palette broyée, résidu d'élagage, canne de Provence et balle de riz).

Les objectifs techniques qui ont été remplis à travers ce projet sont :

- Le dimensionnement et la construction d'un pilote de 550 kW et sa mise en route
- La conception d'un système de contrôle commande performant
- La validation du bon fonctionnement des améliorations développées
- La validation du bon fonctionnement de la centrale avec diverses biomasses confirmant d'une part le respect des valeurs limites d'émission en CO et NO<sub>x</sub>, et d'autre part la qualification de la qualité des cendres produites en fonction de la biomasse et du lieu de prélèvement.

A travers ce projet plusieurs pistes d'amélioration ont été identifiées et sont en cours d'implémentation afin d'optimiser les performances du Gazéotherm HT. D'ores et déjà certaines briques qui ont été développées sont matures pour des applications commerciales :

- La production de chaleur à partir de résidus d'élagage ou agricoles ou de biomasse vierge de qualité et d'humidité variable (jusqu'à 55 %) afin d'alimenter des réseaux de chaleur. L'utilisation de ces ressources permet des équations économiques plus rentables qu'avec les chaudières biomasse traditionnelles. Par ailleurs les niveaux d'émissions de notre technologie respectent la réglementation et sont meilleures que nombre de chaudières biomasses commerciales.
- La production d'électricité et de chaleur en cogénération avec l'utilisation d'huile thermique comme média caloporteur et d'un ORC haute température. Cette configuration permet de produire de l'électricité avec des rendements de l'ordre de 20 % et de produire de la chaleur jusqu'à 90 °C pour de nombreuses applications (séchage, froid, chauffage de piscine ou serres).





## L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Écologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

### LES COLLECTIONS DE L'ADEME



#### ILS L'ONT FAIT

*L'ADEME catalyseur* : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



#### EXPERTISES

*L'ADEME expert* : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



#### FAITS ET CHIFFRES

*L'ADEME référent* : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



#### CLÉS POUR AGIR

*L'ADEME facilitateur* : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



#### HORIZONS

*L'ADEME tournée vers l'avenir* : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.





# PROJET GAZEOTHERM

**Résumé :** Grâce au partenariat entre l'entreprise Mini Green Power et l'unité de recherche BioWooEB du CIRAD et le soutien de l'ADEME, le projet Gazeotherm a pour objectif global de concevoir et tester une unité de valorisation d'une large gamme de résidus végétaux permettant de répondre aux besoins énergétiques locaux (chaleur et électricité).

Cette unité de 550 kWth a été conçue de manière modulaire :

- un module de réception et pré séchage de la biomasse
- un module de gazéification et production d'eau chaude ou d'eau surchauffée
- un module de valorisation de cette eau chaude pour la cogénération d'électricité et chaleur, le séchage, le chauffage, la purification d'eau, la production de froid et d'autres utilisations de chaleur.

Les nombreux essais effectués ont permis de valider :

- la grande flexibilité du procédé en testant des déchets de bois (palettes déclassées), des déchets verts municipaux, de la canne de Provence et de la balle de riz ;
- l'efficacité de conversion de la biomasse par la faible teneur en C dans les cendres ;
- le respect des normes sur les émissions gazeuses (NO<sub>x</sub>, CO) ;
- le fonctionnement de l'automatisme du contrôle commande développé pour cette unité, et qui a démontré son efficacité dans toutes les conditions d'exploitation : démarrages, variations de charge, fonctionnements stabilisés et arrêts, mais aussi lors de coupures du réseau électrique.

## ***Essentiel à retenir***

*Le projet GAZEOTHERM a permis de développer un pilote de pyrogazéification de 550 kW qui valorise les déchets de biomasse en énergie thermique ou électrique. Ce projet soutenu par l'ADEME a été mené en partenariat par Mini Green Power et le CIRAD.*

*Mini Green Power est une jeune start-up qui conçoit et assemble des petites centrales permettant de valoriser un large spectre de biomasse en énergie, dans la gamme de puissance de 500 kW à 5 MW thermiques, soit 40 kW à 1 MW électriques. Ces centrales sont destinées aux entreprises et aux collectivités.*