SHaKE
Sharing Knowledge on Energy Communities

Co-funded by the European Union

Module 3
Production de chaleur

Partie du programme éducatif SHaKE sur les systèmes de chauffage et de refroidissement urbains

Biomasse et conversion de déchets en énergie

Matériel d'apprentissage complémentaire

Version : 1.0
Date : Août 2026
https://www.shakeproject-dhc.eu/

MODULE 3

1.1 Introduction

La transition vers des systèmes énergétiques plus durables et diversifiés a accru l'importance des sources d'énergie renouvelables et alternatives. Parmi celles-ci, la biomasse représente une option particulièrement importante car elle peut être utilisée pour la production de chaleur, la production d'électricité et la production combinée de chaleur et d'électricité. La biomasse est disponible sous plusieurs formes, notamment solide, liquide et gazeuse, chacune nécessitant des technologies différentes pour le stockage, la combustion, la conversion d'énergie et le contrôle des émissions. Sa disponibilité locale ainsi que la possibilité d'utiliser les résidus forestiers, agricoles et organiques font également de la biomasse une option attrayante pour les systèmes énergétiques décentralisés ou les systèmes de chauffage urbain. Parallèlement, l'utilisation de la biomasse est soumise à des limitations technologiques et environnementales, telles que des variations de qualité du combustible, des problèmes liés aux cendres, la corrosion et la disponibilité de ressources biomasses durables.

1.2 Aperçu de la biomasse

La biomasse est une masse de matière organique produite biologiquement. Si la production et l'utilisation de la matière organique sont équilibrées, elle peut être considérée comme une source d'énergie renouvelable. C'est une source d'énergie neutre en carbone. Bien que le dioxyde de carbone soit produit lors du processus de récupération, il n'est pas considéré comme un gaz à effet de serre car le dioxyde de carbone émis a été séquestré de l'atmosphère lors de la formation de la biomasse plusieurs années ou décennies auparavant. Contrairement à la combustion des combustibles fossiles, le dioxyde de carbone qui a été séquestré pendant des dizaines de milliers ou des centaines de milliers d'années n'est pas libéré dans l'atmosphère.



Figure 1. Copeaux de bois dans une centrale à biomasse [1]

Les biomasses peuvent être divisées en trois groupes selon leur état : solide, liquide et gazeux. La biomasse solide peut provenir de plantes ligneuses, herbacées ou même d'élevage. Les biomasses solides se caractérisent par un stockage facile (Figure 1, Figure 2 et Figure 5) et le stockage. Cependant, l'utilisation de combustibles solides est la plus technologique intensive. Cela se reflète dans la consommation énergétique des systèmes de conversion d'énergie eux-mêmes. Le taux d'autoconsommation pour les centrales à biomasse solide se situe entre 10 et 15 %. Les avantages de

la biomasse solide incluent la neutralité carbone, des émissions d'oxydes d'azote plus faibles, mais aussi une meilleure efficacité de combustion qui peut être plus facilement atteinte grâce à la combustion par biomasse. Les inconvénients typiques de la biomasse solide par rapport aux combustibles fossiles sont la forte teneur en métaux alcalino-terro-métallique ainsi que la corrosion du chlore résultant causée par la possible présence de chlore. Ce n'est pas un inconvénient particulier, mais les biomasses solides ont une teneur en volatils significative.



Figure 2. Paille dans une centrale à biomasse [2]

Les biomasses liquides sont principalement des combustibles liquides produits biologiquement, caractérisés par une densité énergétique élevée, caractérisée par un stockage facile (réservoirs à pression atmosphérique). En termes d'utilisation, les combustibles liquides nécessitent peu de préparation supplémentaire. La densité énergétique élevée, la facilité de stockage et d'utilisation rendent les combustibles liquides idéaux pour le transport de véhicules propulsés. Les combustibles typiques de biomasse liquide sont le bioéthanol et le biométhanol, dont l'utilisation est réglementée par plusieurs réglementations.



Figure 3. Fermenteur à biogaz et moteur à gaz [3]

L'utilisation de biomasses gazeuses est simple, ne nécessite pas de déchiqueteurs lourds en énergie, ni de manutention des matériaux, etc. (Figure 3). Cependant, la purification des gaz est souvent nécessaire. Cependant, le stockage de la biomasse gazeuse est une tâche difficile. En général, ils peuvent être stockés à température ambiante à des pressions plus élevées, mais bien sûr, il existe des contenants proches de la pression atmosphérique qui liquéfient le biogaz à très basse température, mais ce n'est pas la solution typique pour le stockage du gaz. Il existe essentiellement deux sources de biomasse gazeuse. Les biogaz produits biologiquement, qui sont des gaz combustibles produits par les bactéries lors de la décomposition de la matière organique. La composante combustible du gaz est principalement le méthane, mais il existe aussi du monoxyde de carbone, du dioxyde de carbone et du sulfure d'hydrogène comme polluants (Tableau 1). La valeur calorifique du biogaz dépend de sa teneur en méthane. Le sulfure d'hydrogène, qui provoque l'acidification, peut entraîner des problèmes de corrosion et d'émissions lorsque le gaz est utilisé.

Tableau 1.: Composants typiques du biogaz (Agence internationale de l'énergie – Perspectives pour le biogaz et le biométhane, https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth/an-introduction-to-biogas-and-biomethane)

Composant	**Formule**	**Concentration**
Méthane	CH_4	**50–70 vol. %**
Dioxyde de carbone	CO_2	**30–50 vol. %**
Azote	N_2	0–5 vol. %
Oxygène	O_2	0–3 vol. %
Hydrogène	H_2	0–1 vol. %
Sulfure d'hydrogène	H_2S	0–2000 ppm
Ammoniac	NH_3	<100 ppm
Vapeur d'eau	H_2O	Variable, souvent saturé

Dans l'ensemble, l'utilisation de la biomasse contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre mais se caractérise par une faible disponibilité locale (difficile à mettre en place des systèmes énergétiques compétitifs avec des économies d'échelle) et une offre totale limitée de biomasse disponible. La biomasse n'est clairement pas une solution à la crise énergétique et au changement climatique, mais en tant que solution complémentaire locale, la biomasse en tant que vecteur d'énergie peut être un excellent choix pour des raisons de sécurité de l'approvisionnement. Figure 4. On voit une centrale de chauffage urbain qui utilise la paille comme combustible principal.



Figure 4. Conduite de paille à la centrale de biomasse [4]

De nombreux systèmes de chauffage urbain et autres systèmes locaux d'approvisionnement énergétique utilisent des chaudières à biomasse. L'utilisation de la biomasse par combustion représente la grande majorité de l'utilisation de biomasse dans le secteur de l'énergie.



Figure 5. Bunker à copeaux de bois [5]

1.3 Regroupement des chaudières à biomasse

1.3.1 Types de milieux de transfert de chaleur

a) Eau chaude

Le type de milieu de transfert de chaleur est essentiellement déterminé par le niveau de température requis par le consommateur de chaleur. Le milieu de transfert thermique le plus utilisé est l'eau/la vapeur car il est bon marché, disponible en grande quantité et non inflammable.

Une chaudière à eau chaude est dite chaude si la température d'eau est inférieure à 115 °C. Le niveau de pression de la chaudière et du système de chauffage est typiquement de 2 à 3 bar(g). Ces chaudières ne nécessitent pas d'inspections fréquentes et sont plus faciles à autoriser et à construire. En cas de

dommage à la partie sous pression, il n'y a aucun risque de fuite de vapeur. Figure 6. montre la taille d'une centrale uniquement à biomasse de 25 MW_{th} en Hongrie.



Figure 6. Centrale de chauffage à biomasse à Kecskemet [6]

b) Eau chaude

Nous faisons référence à une chaudière lorsque la température de départ dépasse 115°C. Dans ce cas, le niveau de pression utilisé est de 8 à 10 bar(g) pour maintenir l'eau sous-refroidie. Le principal avantage de l'eau chaude comme porteur de chaleur est qu'une différence de température plus élevée peut être obtenue chez les consommateurs, éliminant ainsi la nécessité de grands diamètres de tuyaux et réduisant le coût d'investissement du système de chauffage. Une attention particulière doit être prise lors de l'installation et de la réparation des chaudières. En cas de dommage à la partie sous pression, on peut s'attendre à des fuites de vapeur. Cependant, des températures de départ élevées peuvent être atteintes. Les systèmes de chauffage urbain sont généralement équipés de chaudières, mais les températures élevées ne sont plus utilisées pour réduire les pertes du réseau. Un problème typique de fonctionnement des chaudières est la cavitation, qui peut endommager la chaudière et est causée par un débit ralenti dans certains tubes de chaudière (par exemple, un tube contracté à cause d'un défaut de soudure).

Dans de nombreux cas, les anciennes chaudières à gaz naturel sont complétées par des chaudières à biomasse à eau chaude, auquel cas un échangeur de chaleur est nécessaire pour séparer les sections basse et haute pression.

c) Vapeur

La vapeur (vapeur saturée), en tant que porteur de chaleur, est particulièrement importante pour l'apport en chaleur. Les anciens systèmes de chauffage urbain à vapeur ont été en grande partie abandonnés pour des raisons d'efficacité énergétique, mais la vapeur continue de jouer un rôle majeur dans le chauffage industriel. Cela s'explique par les propriétés physiques de base de la vapeur, comme le coefficient de transfert de chaleur très élevé lors de la condensation et la température constante lors de la condensation de la vapeur saturée. Pour cette raison, la vapeur est encore utilisée

aujourd'hui pour les procédés de chauffage industriel, que ce soit dans la production de pneus automobiles, l'industrie papetière ou l'industrie chimique.

La température de condensation de la vapeur saturée est déterminée uniquement par la pression, de sorte que la température peut être régulée en ajustant la pression de la vapeur afin de répondre à une demande de chaleur industrielle donnée. Le coefficient élevé de transfert thermique lors de la condensation signifie qu'une surface d'échange thermique relativement faible est suffisante. Grâce aux performances élevées pouvant être obtenues avec une surface d'échange thermique relativement réduite, le gradient de température de chauffage est également élevé, ce qui permet d'atteindre une vitesse de chauffage rapide.

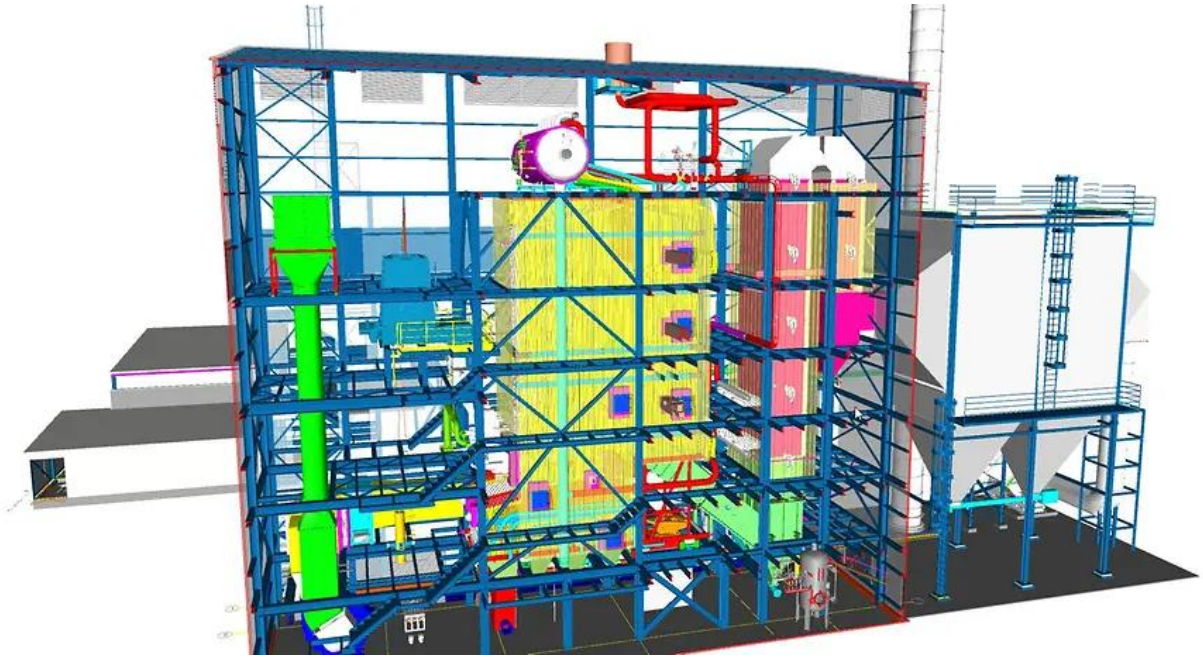


Figure 7. Chaudière à vapeur à biomasse [7]

Les inconvénients des systèmes à vapeur comprennent des pertes thermiques relativement importantes dans le réseau de distribution, ainsi que des coûts d'investissement et d'exploitation significatifs liés à l'utilisation de canalisations conçues pour des pressions plus élevées, au traitement de l'eau de la chaudière et aux exigences en matière de désaération. En outre, les chaudières à vapeur peuvent présenter un rendement global du système inférieur à celui des chaudières à eau chaude dans certaines conditions de fonctionnement, notamment lorsque les pertes thermiques liées à la distribution de la vapeur, au retour des condensats et aux équipements auxiliaires sont prises en compte. Cependant, les chaudières à vapeur modernes (Figure 7), lorsqu'elles sont associées à des systèmes appropriés de traitement de l'eau et à des technologies de récupération de chaleur, telles que les préchauffeurs d'air, peuvent réduire considérablement les pertes énergétiques et atteindre, dans des conditions de fonctionnement appropriées, des niveaux de rendement comparables à ceux des chaudières à eau chaude.

d) Huile thermique

L'huile thermique est un milieu spécial de transfert de chaleur qui combine théoriquement les bienfaits de l'eau chaude et de l'eau tiède (Figure 8). L'huile thermique est un composée carbone-hydrogène avec un point d'ébullition supérieur à 100 °C. Ainsi, des températures directes très élevées (180-280 °C) peuvent être atteintes à une pression proche de celle de l'atmosphère. Le type d'huile thermique

détermine la température de débit la plus élevée disponible. Par conséquent, les chaudières à huile thermique n'ont pas besoin d'être dimensionnées pour des pressions élevées. Il n'est pas nécessaire de fonctionner en continu le dégazage et d'autres traitements de l'eau. Un avantage significatif est que les systèmes d'huile thermique peuvent être installés dans un système en circuit fermé, avec moins d'installations sur site que les chaudières à vapeur ou à eau chaude.

Un inconvénient évident de l'huile thermique est son coût d'investissement plus élevé (l'huile thermique coûte nettement plus cher que l'eau) et sa viscosité plus élevée, ce qui signifie que le travail de circulation est plus important. Cela se constate également par l'utilisation d'une pompe de circulation beaucoup plus grande pour une chaudière à huile thermique de la même capacité de combustion. Du point de vue de la sécurité opérationnelle, il faut considérer que la plupart des huiles thermiques sont inflammables, de sorte que le risque d'incendie en cas de rupture de chaudière est important.

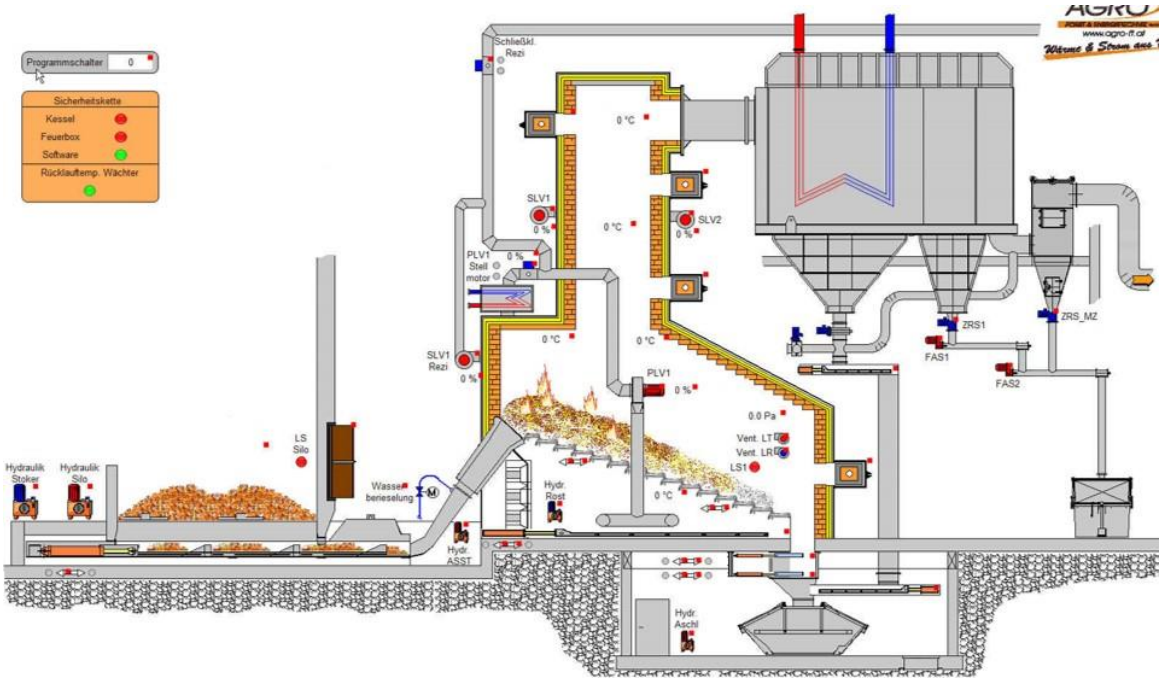


Figure 8. Chaudière à huile thermique (four à grilles) [8]

1.3.2 Types de chambres de combustion

Les chaudières à biomasse solide sont essentiellement des chaudières à lit à grille ou à lit fluidisé. Les procédés de combustion à poudre ne sont pas spécifiques à la biomasse et ne sont donc pas abordés dans cet article.

La grille est responsable du mélange du combustible et de l'air, de l'élimination des scories résultantes et de la distribution de l'air primaire de combustion introduit. Les systèmes de grille sont déplacés pour assurer un meilleur mélange et un fonctionnement automatisé. La combustion de la grille est simple, robuste dans sa conception, peu entretenue et particulièrement insensible à la composition du combustible, à la répartition de la taille et aux matières étrangères. Les grilles peuvent dans de nombreux cas être équipées de refroidissement pour garantir que des températures élevées dans la chambre de combustion n'endommagent pas leur structure.

a) Grille à degrés

Lors de l'utilisation de la grille à degrés (grille à déplacement), les grilles décalées se déplacent d'avant en arrière dans un mouvement en forme de peigne, déplaçant le combustible d'une extrémité à l'autre de la chaudière (Figure 9). La grille à degrés est un design courant, simple et adapté à la construction d'installations à faible puissance. Dans de nombreux cas, la chambre de combustion n'est pas refroidie et il n'y a pas de récupération thermique à l'intérieur de la chambre, ce qui est avantageux notamment pour les faibles puissances, car une bonne efficacité de combustion et des températures stables dans la chambre peuvent être atteintes même à faible puissance. Les grilles d'alimentation sont utilisées pour la biomasse en morceaux (par exemple, copeaux de bois). Les grilles à degrés sont généralement refroidies par eau.



Figure 9. Chaudière à grilles à degrés (7,5 MW) en construction [9]

b) Grille de déplacement

En cas de combustion à grille mobile, le combustible est acheminé à travers la chambre de combustion sur un tapis roulant horizontal. La grille ne peut être refroidie que par l'air de combustion entrant, elle doit donc être dimensionnée pour des charges thermiques élevées. Elle est généralement utilisée pour des capacités de combustion plus petites (quelques MW).

c) Grille vibrante

La grille vibrante implique la construction d'un système de tamisage en forme de tamis, qui est actionné par un moteur électrique, comme montré sur Figure 10. Les grilles vibrantes sont utilisées pour la biomasse fibreuse (par exemple, la combustion de la paille). L'intensité de la vibration de la grille contrôle le temps de résidence dans la chambre de combustion.

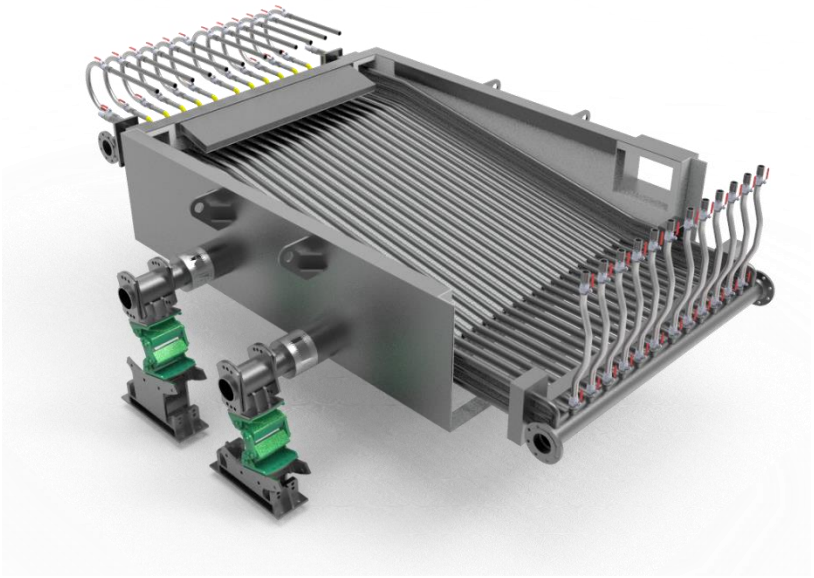


Figure 10. Grille vibrante refroidie à l'eau (source : https://en.akkaya.com.tr/urun/water-cooled-vibrating-grate-system-wcvg/#gallery-0-1)

d) Fours à rouleaux

Le four à rouleaux (Figure 11) est composé de cylindres perforés décalés de grand diamètre. L'air peut circuler à travers les cylindres jusqu'au combustible. Les cylindres tournent à une vitesse lente (quelques tours par minute) pour faciliter le déplacement du combustible à l'intérieur de la chaudière.

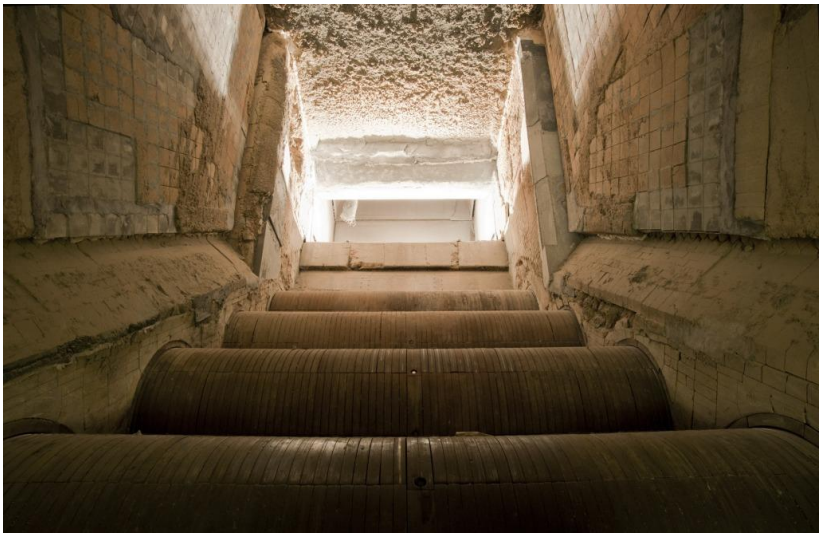


Figure 11. Grille rotative (40 MW) sous entretien [10]

e) Lit fluidisé

La combustion par fluidisation (Figure 12) est un procédé spécial utilisant un matériau fluidisable (généralement du sable de quartz). Dans le lit fluidisé, les particules de combustible « flottent » en brûlant. Ce procédé permet un excellent mélange entre le combustible et l'air de combustion, ce qui permet une bonne efficacité de combustion. De plus, les points d'ébullition locaux, qui peuvent entraîner de fortes émissions d'oxydes d'azote lors de la combustion par grille, sont éliminés. La

libération de la chaleur de combustion ne se produit pas sur une surface presque plane mais sur une surface plus grande, ce qui entraîne une température moyenne plus basse, ce qui a également un effet positif sur la libération d'oxydes d'azote. Le procédé de fluidisation permet donc d'obtenir des paramètres d'émission favorables avec une bonne efficacité de combustion. Cependant, il présente l'inconvénient d'une énergie auxiliaire plus élevée pour les ventilateurs et d'un fonctionnement plus complexe. La température typique de la chambre de combustion varie de 850 à 950 °C. Au-dessus de cette valeur, le lit fluidisé de sable peut s'agglutiner (former des agglomérats), rendant impossible le fonctionnement continu. Les biomasses ayant une faible température de fusion des cendres (biomasses herbacées) augmentent également le risque de formation d'agglomérats.

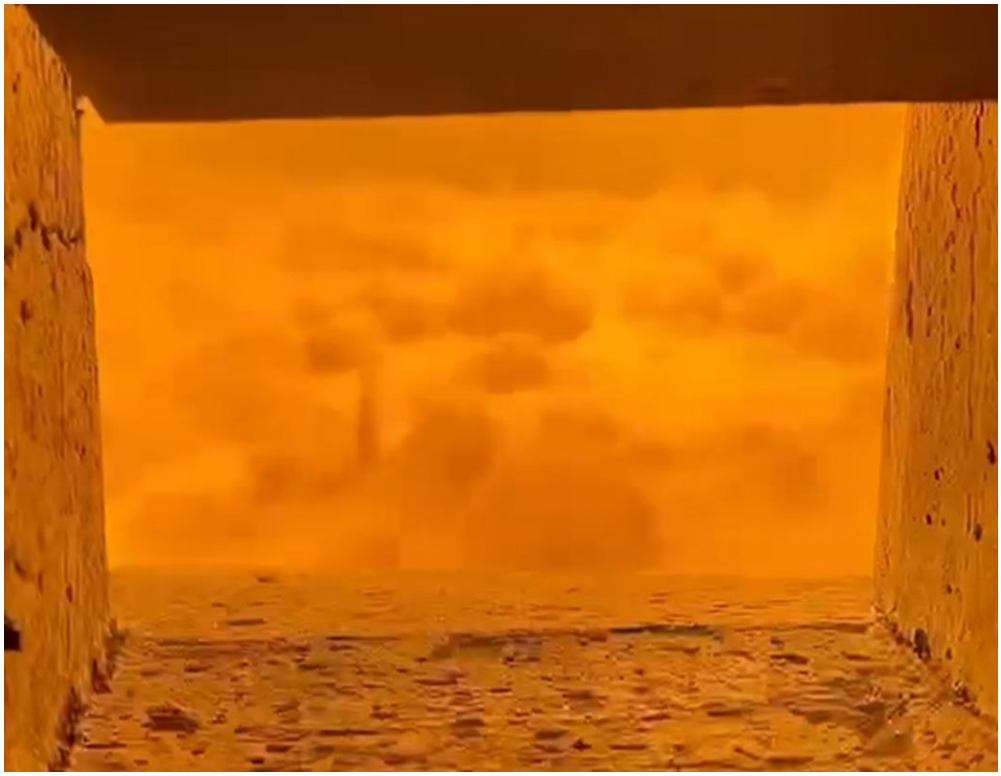


Figure 12. Procédure de démarrage dans une chaudière à lit fluidisé dense

Il existe deux grands types de foyers à lit fluidisé : le lit fluidisé bouillonnant (dense), dans lequel le lit fluidisé se trouve dans la partie inférieure de la chambre de combustion, et le foyer à lit fluidisé circulant, plus perfectionné, dans lequel le lit fluidisé circule en boucle. Cette technologie permet d'atteindre une puissance unitaire plus élevée.

1.3.3 Pression appliquée dans la chambre de combustion

La pression dans la chambre de combustion est essentiellement contrôlée par le ventilateur des gaz de combustion, s'il n'y a pas de ventilation naturelle. Traditionnellement, les chaudières à biomasse présentent un léger vide (dépression) dans la chambre de combustion, de sorte que lors d'une fuite de masse côté gaz de combustion de la chaudière, aucun gaz toxique ne s'échappe dans la chaufferie, mais seule une légère intrusion d'air se produit. Cependant, de nombreux efforts ont également été faits pour exploiter les avantages d'augmenter la pression côté gaz de combustion dans la chambre de combustion.

a) Chambre de combustion en dépression

Un léger vide prévaut dans la chambre de combustion en dépression, avec une valeur relative de seulement quelques mbar. Cependant, ce léger vide suffit à empêcher la fuite de gaz de combustion toxiques vers l'environnement par la chambre de combustion, mais l'air entre dans la chambre de combustion par des moyens non contrôlés. Bien sûr, minimiser l'infiltration d'air reste un intérêt fondamental, car cela réduit l'efficacité de la chaudière (augmente la perte de gaz de combustion). Mais ce n'est pas un risque pour la sécurité si la chaudière n'est pas complètement hermétique.

Le ventilateur de gaz de combustion est responsable du maintien de la dépression si la décharge des gaz de combustion est à écoulement forcé. Dans le cas de la ventilation naturelle des gaz de combustion, la cheminée maintient la dépression dans la chambre de combustion, mais en raison de la difficulté de fonctionnement, le tirage naturel n'est plus utilisé à des capacités plus élevées.

b) Chambre de combustion pressurisée

Avec une chambre de combustion pressurisée, la chaudière est complètement hermétique et le ventilateur à air de combustion assure le passage à travers la chaudière et le système d'échappement des gaz de combustion. Ainsi, la chambre de combustion est surpressurisée de quelques mbar. Cette configuration permet de se passer du ventilateur de gaz de combustion, ce qui est avantageux car elle élimine le besoin d'un ventilateur haute température, mais soulève plusieurs autres problèmes d'alimentation en combustible. Pour les chaudières à biomasse, l'utilisation d'une chambre de combustion pressurisée n'est pas courante.

c) Chambre de combustion surpressurisée (chargée)

Dans le cas des chaudières chargées, il existe une surpression significative (plusieurs bar(g)) dans la chambre de combustion. Les ventilateurs haute pression (soufflante) et compresseurs capables de pressions plus élevées peuvent donc être responsables de l'alimentation en air de combustion aux chaudières. La pression d'air plus élevée augmente le coefficient de transfert de chaleur entre les gaz de combustion et l'acier, réduisant ainsi la surface de transfert de chaleur nécessaire (chaudières plus petites de capacité similaire). Cependant, l'alimentation en combustible de la chambre de combustion nécessite des systèmes complexes, car la surpression doit être maintenue lors de l'alimentation. Il existe plusieurs solutions pour alimenter les combustibles solides dans l'espace pressurisé : Différents systèmes de transfert sont utilisés, mais la solution techniquement la plus fiable consiste à utiliser une combustion de combustible pulvérisé, selon laquelle le combustible solide est broyé en poudre à la pression atmosphérique, puis cette poudre est injectée dans le foyer de la chaudière à l'aide d'un fluide auxiliaire sous haute pression. Ces systèmes nécessitent à leur tour des combustibles biomasse de haute qualité, homogènes et exempts de matières étrangères. Ces combustibles sont généralement plus coûteux.

1.4 Système de conversion d'énergie pour la combustion de la biomasse

1.4.1 Turbine à vapeur

Les turbines à vapeur sont des dispositifs ayant une histoire remontant à plus d'un siècle qui convertissent l'énergie interne de la vapeur en travail mécanique (et, via un générateur, en énergie électrique). La turbine à vapeur est le type de centrale thermique le plus couramment utilisé dans les centrales à biomasse.

En termes de production de chaleur (chauffage urbain), nous distinguons trois types de base.

a) Turbine à vapeur à condensation

La turbine à vapeur à condensation, où la chaleur utile n'est pas possible, car la vapeur se dilate à une pression correspondant à la température ambiante. Dans ce cas, la production d'électricité est maximisée, alors qu'il n'y a pas de chaleur utile produite.

b) Turbine à vapeur à extraction-condensation

La turbine à vapeur extraction-condensatrice (Figure 13) est une partie de la vapeur extraite à une pression plus élevée (et donc à la température de saturation), où sa température reste suffisamment élevée pour le chauffage urbain (ou de récupération de chaleur). Ce type de turbine est la solution la plus couramment utilisée pour la production combinée de chaleur et d'électricité, car la section de la turbine à condensation offre une certaine flexibilité dans la production : en l'absence de demande thermique, un débit massique plus important est détendu puis envoyé vers le condenseur ; lorsque la demande de chaleur augmente, moins de vapeur est détendue dans la turbine. Il est important de noter que, dans ce cas, augmenter la production de chaleur entraîne une diminution de la production électrique. Une turbine à vapeur extraction-condensation de taille correcte peut couvrir une large plage de puissance thermique. Son avantage est la production d'énergie flexible ; son inconvénient est que, en cas de perte de chaleur significative, l'efficacité de la section condensée diminue, car un débit massique beaucoup plus faible s'y développe grâce à l'extraction. La quantité de vapeur extraite peut souvent être contrôlée en installant des vannes de recharge dans la turbine. En régulant la valve, la quantité de vapeur s'écoulant dans la section de condensation peut être réduite, augmentant ainsi la quantité de vapeur atteignant les échangeurs de chaleur.

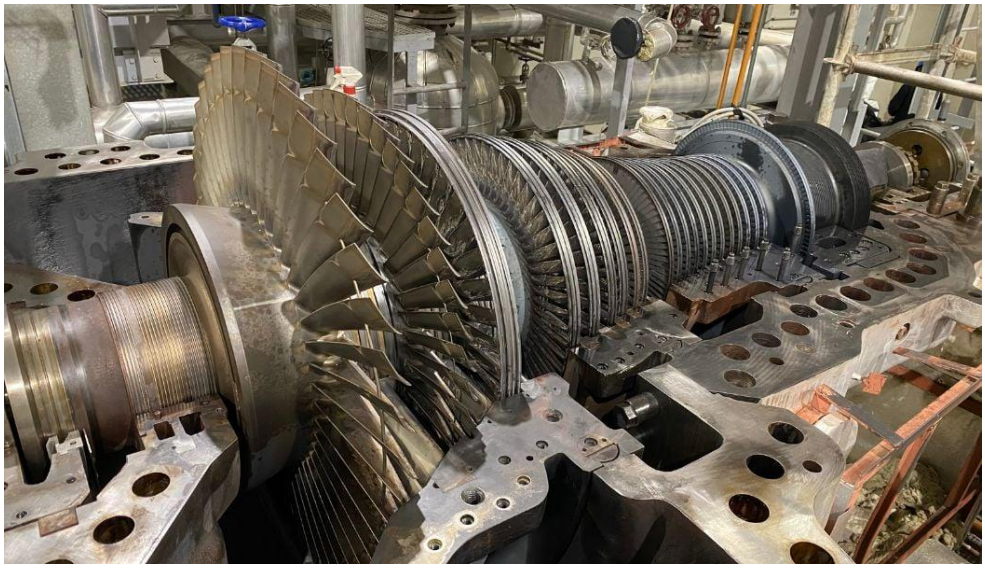


Figure 13. Rotor de turbine à vapeur à extraction-condensation [11]

c) Turbine à vapeur de contre-pression

Le troisième type (et le moins cher) de turbine est la turbine à vapeur à contre-pression (Figure 14, Figure 15). Dans ce cas, la turbine ne possède pas de section de condensation (c'est pourquoi ce type de turbine est peu coûteux, car les plus grands — et donc les plus coûteux — étages de condensation sont omis). Dans les applications de chauffage urbain, la vapeur sort de la turbine à une pression de 0,8 à 1,2 bar(g) et est dirigée vers les échangeurs de chaleur. Une caractéristique particulière de cette turbine est que, lorsque les besoins en chaleur diminuent, sa production électrique diminue également, puisqu'aucune extraction de chaleur n'est nécessaire pour la

condensation de la vapeur (et donc pour maintenir l'admission de vapeur dans la turbine). Malgré leur simplicité, les turbines à contre-pression sont moins couramment utilisées dans les systèmes modernes de chauffage à débit variable, car il est très difficile de répondre à des besoins calorifiques qui fluctuent fortement tout au long de la journée. Cependant, elles constituent une méthode idéale et efficace pour la production combinée de chaleur en charge hivernale. Une turbine à vapeur à contre-pression est également communément appelée turbine à échange de chaleur complète, car tout le débit de masse de vapeur se condense dans les échangeurs de chaleur. En cas de demande de chaleur insuffisante, ces turbines ne peuvent pas fonctionner. Suivre les besoins de chauffage variables dans le temps du côté de la turbine pose des défis, car la charge partielle minimale pour une turbine à vapeur typique est de 40 %. À faible charge, les forces exercées sur les aubages de la turbine augmentent, et la température de l'embout d'échappement commence également à augmenter en raison de la dégradation du rendement isentropique. Une température maximale stricte est fixée pour cet embout ; lorsque cette limite est atteinte, la turbine doit être arrêtée.



Figure 14. Turbine à vapeur de contre-pression (2 MWe)



Figure 15. Turbine-générateur à vapeur de contre-pression (27 MWe) [12]

1.4.2 Cycle organique de Rankine

Le cycle organique de Rankine (ORC) est une centrale thermique très compacte (Figure 16) qui peut être connectée à pratiquement n'importe quelle source de chaleur. L'avantage principal de l'ORC est qu'elle peut être mise en œuvre à faible capacité unitaire, même lorsqu'elle est logée dans un conteneur, ce qui est idéal notamment pour les centrales à biomasse dans la plage de quelques MW. D'un point de vue thermodynamique, il s'agit aussi d'un cycle de Rankine, tout comme dans le cas des turbines à vapeur, mais ici un fluide de travail organique se dilate. Un avantage supplémentaire est qu'il peut fonctionner à des températures plus basses (180–300 °C pour la biomasse). Un inconvénient est le coût spécifique en capital extrêmement élevé.



Figure 16. ORC de chauffage urbain [13]

L'apport de chaleur peut être fourni par la vapeur générée dans une chaudière à biomasse, mais l'huile thermique est généralement préférée. Ainsi, le fluide organique de travail de l'ORC ne s'écoule pas directement dans la chaudière ; il existe plutôt une boucle de séparation de l'huile thermique. Malheureusement, cela augmente l'auto-consommation du système, car une pompe de circulation doit être installée dans la boucle d'huile thermique, mais cela permet de réduire le volume du fluide de travail de l'ORC. La cogénération utilisant un cycle ORC est également réalisable ; selon des exemples internationaux, elle est souvent réalisée par une extraction complète de chaleur (c'est-à-dire à l'aide d'un expanseur ORC à contre-pression). Ces systèmes peuvent essentiellement compléter la production d'une centrale de chauffage à biomasse, et la quantité d'électricité générée peut être suffisante pour répondre à la consommation électrique du système de chauffage urbain. L'efficacité électrique du système est d'environ 8 à 10 %, comparée aux cycles de turbine à vapeur fonctionnant à des pressions et températures plus élevées, qui peuvent atteindre des rendements électriques d'environ 18 à 24 %. La cogénération ORC à base de biomasse constitue donc une transition entre le chauffage urbain provenant des centrales thermiques à biomasse et la production d'énergie à partir de centrales à vapeur.

1.4.3 La turbine est un moteur à gaz

La production d'électricité par moteur à essence (Figure 17) et par turbine à gaz (Figure 18) ne peut utiliser que la biomasse gazeuse. Cependant, ils le font avec une efficacité électrique exceptionnellement élevée. Les moteurs à gaz (Figure 19) fonctionnent selon le cycle Otto conventionnel, tandis que les turbines à gaz fonctionnent selon le cycle Joule-Bryton. Les moteurs à gaz sont plus répandus car leur efficacité électrique est nettement supérieure à celle des turbines à gaz, surtout à faible puissance. Le rendement électrique atteint avec les turbines à gaz varie de 25 % à 30 %, tandis que les moteurs biogaz peuvent fonctionner à des rendements de 35 % à 40 %. Un autre avantage significatif est que les caractéristiques de couple des moteurs à gaz sont plus favorables que celles des turbines à gaz, car ils peuvent fournir un couple élevé à bas régime. L'avantage des turbines à gaz est qu'elles nécessitent moins d'entretien que les moteurs à gaz. Dans de nombreux cas, elles ne nécessitent même pas d'huile lubrifiante (grâce à l'utilisation de roulements lubrifiés par l'air).



Figure 17. Installation de moteurs à biogaz [14]

Les moteurs à gaz – et, plus rarement, les turbines à gaz (Figure 18) – font partie intégrante du fonctionnement des usines de biogaz, des stations d'épuration des eaux usées et des décharges. Dans de nombreux cas, le biogaz utilisé peut être considéré comme un « déchet », puisque sa production est un sous-produit d'un procédé d'élimination des déchets.

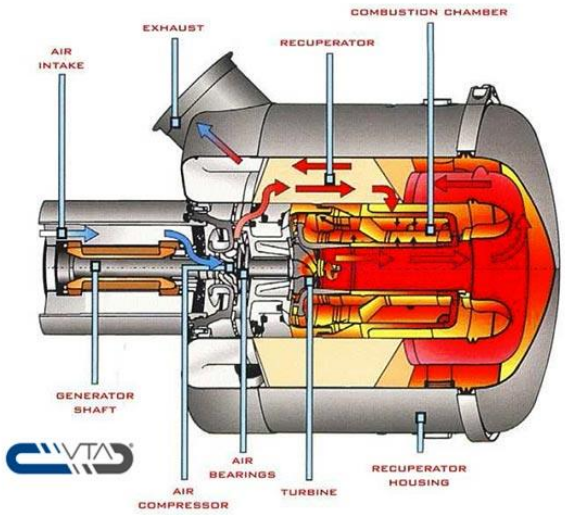


Figure 18. Schéma d'une microturbine à biogaz [15]

La durée de vie attendue des moteurs à biogaz est plus courte que celle des moteurs au gaz naturel, car le combustible contient des quantités importantes de gaz corrosifs et peut également contenir de la poussière, ce qui peut entraîner l'usure de l'équipement. Comme la récupération de chaleur n'est pas possible dans la plupart des endroits (ils sont trop éloignés des systèmes de chauffage urbain), une solution plus économe en énergie peut être de produire du biométhane et de l'injecter dans le réseau de gaz naturel. Dans ce cas, le biogaz doit être purifié pour obtenir une qualité de gaz naturel ; en particulier, la teneur en sulfure d'hydrogène corrosif doit être presque entièrement éliminée afin qu'elle puisse être injectée dans le réseau de gaz naturel.

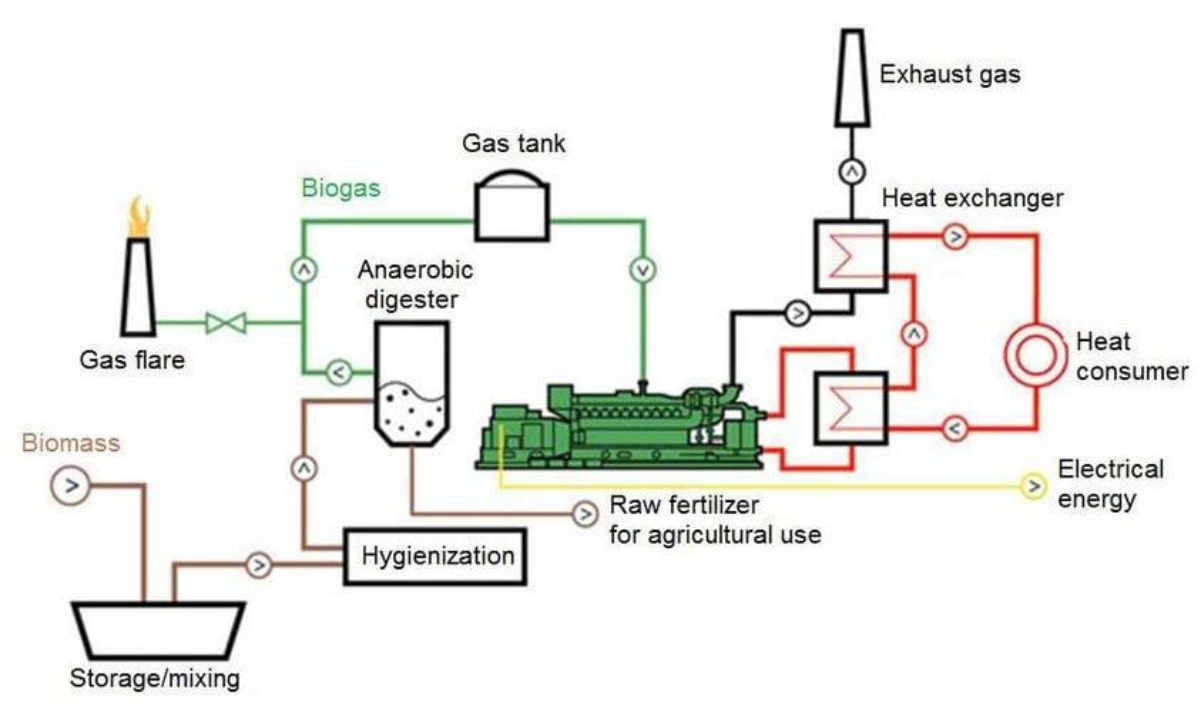


Figure 19. Schéma d'une usine de biogaz avec moteur à gaz [16]

1.5 Capitalisation des déchets en énergie

La récupération d'énergie à partir des déchets constitue une forme particulière d'utilisation de la biomasse, puisque cette biomasse est produite par l'homme et non par d'autres organismes vivants. Elle se distingue strictement des autres types de biomasse, d'abord parce qu'elle contient une teneur en fossiles significative (~50 %) (puisque les plastiques utilisés pour la récupération d'énergie sont fabriqués à partir de pétrole brut). De plus, ces installations sont soumises à des réglementations totalement différentes (beaucoup plus strictes) concernant les émissions. La récupération énergétique des déchets fait l'objet de nombreux débats publics ; cependant, on peut affirmer qu'elle fait partie intégrante de la vie métropolitaine, puisqu'une métropole génère un volume de déchets si concentré que ni le recyclage des matériaux ni la décharge ne sont une solution viable. Tableau 2 montre la production de déchets par habitant dans divers pays européens. Un niveau de vie plus élevé est associé à une consommation accrue et, par conséquent, à une production de déchets plus élevée.

Tableau 2. : Production de déchets par habitant [17]

Pays	Déchets municipaux générés (kg/personne/an)	Année de référence
AT Autriche	**782 kg**	2023
DK Danemark	**755 kg**	2023
BE Belgique	**699 kg**	2023
LU Luxembourg	**~673 kg**	2023
DE Allemagne	**~618 kg**	2023

Pays	Déchets municipaux générés (kg/personne/an)	Année de référence
FR France	**~514 kg**	2023
ES Espagne	**~467 kg**	2023
IT Italie	**~494 kg**	2023
HU Hongrie	**~413 kg**	2023
PL Pologne	**387 kg**	2023
EE Estonie	**375 kg**	2023
RO Roumanie	**305 kg**	2023
Moyenne européenne 511 kg		2023

La conversion des déchets en énergie se fait souvent en conjonction avec le chauffage urbain (CHP), car ces centrales de conversion en énergie sont situées à proximité des villes et des systèmes de chauffage urbain (Figure 20, Figure 21).



Figure 20. Usine de valorisation énergétique des déchets à Vienne [18]

a) Emissions

Les limites d'émission pour l'incinération des déchets sont les plus strictes et nettement plus strictes que celles des chaudières à biomasse (par exemple, à la paille) de même capacité. Le tableau 3 présente les limites applicables pour chaque polluant. Le respect de ces limites nécessite des systèmes avancés d'épuration des gaz de combustion ; cependant, la construction de tels systèmes peut minimiser l'impact environnemental de la centrale de valorisation des déchets. Dans de nombreux cas,

les centrales de valorisation des déchets sont situées à l'intérieur des limites de la ville (par exemple, Vienne). Cela est rendu possible grâce aux procédés modernes d'épuration des gaz de combustion. Les limites d'émission applicables (Tableau 3.) sont définies dans la directive européenne sur les EEI 2010/75/UE ; des limites plus strictes sont fixées dans le BAT-AEL 2019/2010/UE, qui s'appliquent aux nouvelles centrales de valorisation des déchets construites. Des limites plus strictes que les limites légales peuvent également être fixées pour une installation spécifique.

Tableau 3. Limites d'émission des usines d'incinération des déchets

Polluants	**2010/75/EU IED d'origine ELV**	**2019/2010/EU BAT-AEL – nouvelles usines**
Poussières	10 mg/Nm³	**<2–5 mg/Nm³**
HCl	10 mg/Nm³	**<2–6 mg/Nm³**
HF	1 mg/Nm³	**<1 mg/Nm³**
SO_2	50 mg/Nm³	**5–30 mg/Nm³**
NO_x (sous le nom de NO_2)	200 mg/Nm³	**50–120 mg/Nm³**
CO	50 mg/Nm³	**10–50 mg/Nm³**
NH_3	–	**2–10 mg/Nm³**

Une exigence importante concernant la température de la chambre de combustion est que les gaz de combustion doivent rester à 850 °C pendant au moins 2 secondes après le dernier point d'injection d'air. Cela est nécessaire pour garantir que les dioxines et furanes, qui sont très nocifs pour la santé, soient complètement brûlés. Les chaudières doivent être équipées de brûleurs automatiques de secours qui s'activent sans intervention de l'opérateur si la température descend en dessous de 850 °C.

La perte au feu des cendres du foyer doit rester inférieure à 5 % ; par conséquent, les cendres quittant la chaudière ne doivent contenir que très peu d'imbrûlés.



Figure 21. Centrale de valorisation des déchets à Budapest [19]

b) Chaudières

En ce qui concerne les chaudières, la solution moderne la plus courante est la grille dite à recul (Figure 22); Dans ce cas, les éléments de la grille attirent les particules de déchets déjà en combustion sous les déchets nouvellement arrivés, favorisant ainsi un séchage et un allumage rapides du combustible. Dans les systèmes traditionnels, la combustion à lit fluidisé et à rouleaux peut également être utilisée. Dans le cas d'un four à rouleaux, le combustible est enflammé par la voûte au-dessus des déchets (maçonnerie épaisse à rayonnement thermique). Comme la teneur en humidité du combustible peut varier considérablement selon les conditions météorologiques, l'air de combustion peut être préchauffé à 180–240 °C à l'aide d'échangeurs chauffés à la vapeur. Les chaudières sont très sensibles à la corrosion en raison de la teneur en chlore du combustible. Pour réduire la corrosion, des paramètres de vapeur faibles (40 bar(g), 420 °C) sont utilisés.



Figure 22. grille dans une usine d’incinération [20]

En raison des faibles paramètres de vapeur, l'efficacité électrique de la centrale est faible comparée à celle des centrales à biomasse de capacité similaire ; cependant, assurer la disponibilité des équipements (réduction des pannes) est une considération plus importante. La philosophie moderne de conception des chaudières exige que les échangeurs de chaleur individuels soient aussi facilement accessibles que possible. Cela vise à garantir que les fuites anticipées de tuyauterie puissent être réparées avec le plus court temps d'arrêt possible. Des efforts sont également déployés pour réduire les pannes liées à la corrosion dans les incinérateurs modernes grâce à l'utilisation de superalliages d'acier (par exemple, Inconel 625) ; cependant, ces alliages augmentent significativement le coût en capital des chaudières, ils sont donc utilisés uniquement sur les surfaces les plus exposées à la corrosion (par exemple, les surchauffeurs).

c) Turbines à vapeur

Les centrales de conversion des déchets en énergie sont généralement équipées de turbines à vapeur extraction-condensation (Figure 23). Les échangeurs de chaleur chauffés par de la vapeur d'extraction à haute pression sont responsables du chauffage urbain. Si le système de chauffage urbain n'a pas une demande thermique suffisamment élevée (par exemple, lors de la production de l’ECS seulement en été), la vapeur peut continuer à s'étendre vers le condenseur, augmentant ainsi la production électrique de la centrale.



Figure 23. Turbine à vapeur à extraction-condensation dans un incinérateur à Budapest [19]

Pour augmenter l'efficacité de la production d'électricité, un procédé d'extraction de vapeur en deux étapes est souvent utilisé. Cela signifie que la vapeur est extraite de la turbine non pas à un, mais à deux niveaux de pression. Cela réduit les pertes de qualité lors de la récupération de chaleur (la vapeur à haute température n'est pas gaspillée pour produire de l'eau chaude à basse température pour le chauffage, mais est utilisée pour entraîner davantage la turbine).

d) Efficacité énergétique

On peut parler de récupération d'énergie à partir des déchets lorsque l'efficacité de conversion énergétique répond aux exigences R1. Le critère R1 d'efficacité énergétique, basé sur la directive-cadre européenne sur les déchets (directive 2008/98/CE, annexe II), détermine si une installation qui incinère des déchets municipaux est une opération de récupération (R1 – « Utiliser principalement comme combustible ou autre moyen de production d'énergie ») plutôt qu'une opération d'élimination (D10). Le calcul est basé sur un bilan énergétique annuel et prend en compte la production d'électricité et de chaleur utile, ainsi que la teneur énergétique des déchets et des combustibles auxiliaires. Les installations autorisées après le 31 décembre 2008 doivent atteindre une valeur d'au moins R1 = 0,65, tandis que les installations déjà en activité et autorisées avant 2009 doivent atteindre une valeur de R1 ≥ 0,60. La valeur R1 doit être calculée selon la formule spécifiée par la Commission européenne, et le facteur de correction climatique (CCF) applicable doit également être pris en compte dans le calcul. [21]

$$R1 = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0.97 \times (E_w + E_f)}$$

où :

- Ep = énergie annuelle produite sous forme de chaleur ou d'électricité. L'électricité est multipliée par 2,6, tandis que la chaleur produite pour un usage commercial est multipliée par 1,1 (GJ/an).
- Ef = apport énergétique annuel au système provenant des combustibles contribuant à la production de vapeur (GJ/an).
- Ew = énergie annuelle contenue dans les déchets traités, calculée à l'aide de la valeur calorifique nette (PCI) des déchets (GJ/an).
- Ei = énergie annuelle importée dans le système, à l'exclusion des Ew et Ef (GJ/an).
- 0,97 = facteur de correction tenant compte des pertes d'énergie dues à la cendre de fond et au rayonnement.

Pour que les usines municipales d'incinération des déchets solides soient classées comme opérations de récupération R1, l'efficacité énergétique calculée doit être d'au moins 0,60 pour les installations en service et autorisées avant le 1er janvier 2009, ou 0,65 pour les installations autorisées après le 31 décembre 2008

Bibliographie

[1] 13454164705_6980009784_b.jpg (1024×683) n.d. https://millerwaste.ca/wp-content/uploads/2024/09/13454164705_6980009784_b.jpg (accessed August 14, 2026).

[2] (31) Biomassza-kazán a pécsi erőműben - YouTube n.d. https://www.youtube.com/watch?v=ekyrOkpIZQs (accessed August 14, 2026).

[3] How a Biogas CHP Plant Works: 7 Key Components and Their Business Impact n.d. https://www.biogasupgradingplants.com/biogas-blogs/118.html (accessed August 14, 2026).

[4] Csökkent a pécsi erőmű porkibocsátása – Alternativ Energia n.d. https://alternativenergia.hu/csokkent-a-pecsi-eromu-porkibocsatasa/ (accessed August 14, 2026).

[5] hackschnitzel_saegespaene0003-1024x682.jpg (1024×682) n.d. https://www.maresch.co.at/wp-content/uploads/produktion/hackschnitzel_saegespaene0003-1024x682.jpg (accessed August 14, 2026).

[6] Zöld távhő fejlesztési projekt - KECSKEMÉTI TERMOSTAR Hőszolgáltató Kft. n.d.

[7] ANDRITZ supplies a leading sugar producer in Hungary with a new biomass boiler n.d. https://www.andritz.com/newsroom-en/pulp-paper/2023-06-20-hungrana (accessed August 14, 2026).

[8] Company – AGRO Forst & Energietechnik n.d. https://www.agro-ft.at/en/company/ (accessed August 14, 2026).

[9] 2980. oldal - közélet | SONLINE n.d. https://www.sonline.hu/rovat/kozelet?page=2980#google_vignette (accessed August 14, 2026).

[10] Mi a szemét útja a kukánktól a radiátorig? – a Hulladékhasznosító belülről n.d. https://enbudapestem.hu/2023/10/16/mi-a-szemet-utja-a-kukanktol-a-radiatorig-a-hulladekhasznosito-belulrol (accessed August 14, 2026).

[11] steam_turbine_work.jpg (1050×600) n.d. https://www.araner.com/hs-fs/hubfs/steam_turbine_work.jpg?width=1050&height=600&name=steam_turbine_work.jpg (accessed August 14, 2026).

[12] oglasjhi.png (500×332) n.d. https://eromuvekejszakaja.hu/wp-content/uploads/photo-gallery/thumb/oglasjhi.png?bwg=1750842570 (accessed August 14, 2026).

[13] maxresdefault.jpg (1280×720) n.d. https://i.ytimg.com/vi/UnduQ_PQnWo/maxresdefault.jpg (accessed August 14, 2026).

[14] aHR0cHM6Ly9jbXNjZG4uYXBwLmNvbnRlbnQucHJpdmF0ZS9jb250ZW50L2MxZWNlOWI0YTI1MzQ5YjM4MTA3YThmYWM1NjU3NTY0.jpg (1200×900) n.d. https://cdn.szegedma.hu/2026/03/kW4Zc5cB7hnU7Crtd0bZR8kiCZ9Qf3zkgEUfMOG5Fbw/fit/1200/900/no/1/aHR0cHM6Ly9jbXNjZG4uYXBwLmNvbnRlbnQucHJpdmF0ZS9jb250ZW50L2MxZWNlOWI0YTI1MzQ5YjM4MTA3YThmYWM1NjU3NTY0.jpg (accessed August 14, 2026).

[15] 097-VTA-Gasturbine-m-logo.jpg (594×500) n.d. https://www.ecodesign-beispiele.at/userfiles/images/097-VTA-Gasturbine-m-logo.jpg (accessed August 14, 2026).

[16] (PDF) Biogas production from pig slurry - feasibility and challenges n.d. https://www.researchgate.net/publication/281368872_Biogas_production_from_pig_slurry_-_feasibility_and_challenges (accessed August 14, 2026).

[17] Municipal waste statistics - Statistics Explained - Eurostat n.d. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics (accessed August 14, 2026).

[18] Vienna Has The Coolest Incinerator In The World - Bonus Nachos n.d. https://bonusnachos.com/vienna-has-the-coolest-incinerator-in-the-world/ (accessed August 14, 2026).

[19] FHHM illusztrációs fotók - Google Fotók n.d. https://photos.google.com/share/AF1QipPjRCyxxI-LpV1JLcXtH3xp8AAOxRLHWZI2k39wbEBaM6yUwU1V8uimrPIHQCrTFw?key=b2NzRURneURlUHJfVk83dV9ZYzhwRmh5alE1QmhR (accessed August 14, 2026).

[20] Water-Cooled Wear Zones for WTE Boilers to Reduce Maintenance » Babcock & Wilcox n.d. https://www.babcock.com/home/products/water-cooled-wear-zones (accessed August 14, 2026).

[21] Irányelv - 2008/98 - EN - EUR-Lex n.d. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/ALL/?uri=celex:32008L0098 (accessed August 14, 2026).